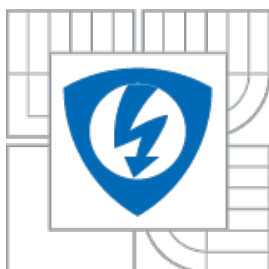




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION**  
**DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS**

# **ELEKTRICKÉ CHARAKTERISTIKY BARIÉROVÉHO VÝBOJE PRO STERILIZACI MIKROORGANISMŮ**

**ELECTRICAL FEATURES OF BARRIER DISCHARGE FOR MICROORGANISM  
STERILIZATION**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JAN BERNÁT**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. RNDr. MILADA BARTLOVÁ, Ph.D.**

BRNO 2010





**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Jan Bernát

**ID:** 102390

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Elektrické charakteristiky bariérového výboje pro sterilizaci mikroorganismů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proměřte VA charakteristiky zapálení bariérového výboje.
2. Určete vliv průtoku a typu nosného plynu na VA charakteristiku a moment zapálení bariérového výboje.
3. Proměřte dynamické charakteristiky bariérového výboje v různých nosných plynech o různém průtoku.
4. Stanovte energetické poměry ve výboji pomocí dynamických charakteristik.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Krčma, F.: Kinetic Processes in Nitrogen Post-Discharge Plasmas, VUT IUM Brno 2004, pages 1 – 40, Edice Habilitační a inaugurační spisy, svazek 132, ISSN 1213-418X, ISBN 80-214-2572-5.
- [2] Krčma F., Protasevich E. T.: Post-discharges in Pure Nitrogen and in Nitrogen Containing Halogenated Hydrocarbon Traces, Tomsk Polytechnic University Publishing, Tomsk 2003, pages 1 – 132, ISBN 189-8326-444.
- [3] Krčma F.: Spectroscopic Studies of the Methane Traces Influence on the Nitrogen Afterglow, Ph.D. Thesis, Brno 1995, pages 1 – 210.

**Termín zadání:** 29.1.2010

**Termín odevzdání:** 2.6.2010

**Vedoucí práce:** doc. RNDr. Milada Bartlová, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.



## Anotace

Práce se zabývá studiem bariérového výboje v plynu, z hlediska elektrických vlastností a procesů odehrávajících se ve výboji. Samotnému studiu výboje předchází teoretické pojednání o plazmatu, jeho vlastnostech a základní informace o bariérovém výboji. Druhá část práce se již zabývá zpracováním naměřených údajů na experimentálním zařízení a následným vyvozováním závěrů. Zásadní roli zde hraje vztažení okamžitého výkonu  $P[W]$  a elektrického příkonu  $P_{el}[W]$  k napájecímu napětí. Použity byly plyny dusík a argon při různých konfiguracích experimentálního zařízení, jako je rychlost průtoku plynu, vzdálenost elektrod, použitá frekvence napájecího napětí a jeho různé úrovně. V práci je navrhnout postup jakým je možné provádět další měření. Rozsah práce nedovoluje podrobné prozkoumání každého aspektu který byl měřen, nebo následným zpracováním dat vydedukován, ale na tyto aspekty upozorňuje a navrhuje jejich další výzkum.

## Klíčová slova:

Plazma, bariérový výboj, okamžitý výkon, elektrický příkon, výboj v dusíku, výboj v argonu

## Abstract

This thesis deals with barrier discharge through gases from the point of view of electrical attributes and processes that, which are going on in a discharge. The research of a discharge itself is preceded by theoretical discourse about plasma and its attributes and basic information about barrier discharge. Second part deals with processing measured data on an experimental device and is followed by making deduction. The main role is relating instantaneous power  $P[W]$  and power drain  $P_{el}[W]$  to supply voltage. Nitrogen and argon gases were used and the experimental measuring device was set in different configuration of gas flow velocity, distance between electrodes, used frequency of a supply voltage and its different level. An algorithm describing proceeding with another data measuring is described in this thesis. The scope of the thesis does not allow for thorough examining of each aspect, which was measured or deduced from data analysis. However the the thesis addresses these aspects and suggests further research.

## Keywords:

Plasma, barrier discharge, instantenous power, power drain, disscharge in nitrogen, disscharge in arogon

BERNÁT, J. *Elektrické charakteristiky bariérového výboje pro sterilizaci mikroorganismů*.  
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,  
2010. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Milada Bartlová, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Elektrické charakteristiky bariérového výboje pro sterilizaci mikroorganismů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 1.6.2010

.....  
(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové (bakalářské) práce doc. RNDr. Miladě Bartlové, Ph.D., za velmi užitečnou pomoc při zpracování bakalářské práce.

A dále děkuji doc. RNDr. Františku Krčmovi, Ph.D., za poskytnutí cenných rad a pomoci, při měření a zpracování dat do bakalářské práce.

V Brně dne 1.6.2010

.....  
(podpis autora)





# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Obsah.....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>1 Úvod.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2 Plazma.....</b>  | <b>10</b> |
| 2.1 Co je to plazma.....  | 10        |
| 2.2 Základní charakteristiky plazmatu.....                        | 11        |
| 2.2.1 Debyeho poloměr.....  | 11        |
| 2.2.2 Stupeň ionizace.....  | 12        |
| 2.2.3 Plazmová frekvence.....                                     | 12        |
| 2.2.4 Srážkové procesy.....                                       | 13        |
| <b>3 Elektrické výboje v plynech .....</b>                        | <b>14</b> |
| 3.1 Základní typy elektrických obvodů pro tvorbu plazmatu .....   | 15        |
| 3.2 Rozdělení výbojů.....   | 16        |
| 3.3 Charakteristika výboje.....                                   | 17        |
| <b>4 Bariérový výboj.....</b>                                     | <b>19</b> |
| 4.1 Princip.....  | 19        |
| 4.2 Filamentární mód.....   | 21        |
| 4.2.1 Chování filamentárního výboje v mikroskopickém měřítku..... | 25        |
| <b>5 Experimentální zařízení.....</b>                             | <b>26</b> |
| <b>6 Cíl měření.....</b>  | <b>27</b> |
| 6.1 Postup měření.....  | 28        |
| 6.2 Naměřené hodnoty.....   | 29        |
| <b>7 Zpracování dat.....</b>                                      | <b>33</b> |
| 7.1 Okamžitý výkon.....   | 33        |
| 7.1.1 Argon.....  | 33        |
| 7.1.2 Dusík.....  | 36        |
| 7.1.3 Srovnání .....  | 38        |
| <b>8 Výpočet elektrického příkonu.....</b>                        | <b>39</b> |
| <b>9 Závěr.....</b>   | <b>43</b> |
| <b>10 Použitá literatura.....</b>                                 | <b>44</b> |
| <b>11 Seznam příloh.....</b>                                      | <b>45</b> |

# 1 Úvod

Předmětem této práce je studium bariérového výboje v plynu a jeho fyzikálních vlastností. Při takovémto výboji se za určitých jasně definovaných podmínek mění plyn své skupenství a stává se plazmatem. Proto je úvod práce věnován základním charakteristikám plazmatu a seznámení s jeho využitím v praxi i vědeckém výzkumu. Hlavní důraz je kladen na rozbor elektrických výbojů v plynech, jejich rozdělení a klasifikaci podle vlastností a podmínek nutných k jejich vzniku a jejich vliv na druh vzniklého plazmatu. V závěru práce je podrobnější náhled právě na bariérový výboj, popsán jeho princip a důkladněji rozebráno jeho chování. Vše je zakončeno stručným popisem měřicí aparatury sestavené a umístěné na FCH VUT v Brně, na které bude probíhat praktická část měření, pro konkrétní konfiguraci elementů potřebných k vzniku bariérového výboje.

## 2 Plazma

### 2.1 Co je to plazma

Slovo plazma poprvé použil český Jan Evangelista Purkyně v oboru medicíny. V roce 1927 toto pojmenování použil americký chemik Irving Langmuir k označení ionizovaného plynu[1].

Plazma je soubor nabitých i neutrálních částic v různých kvantových stavech, o kterém platí, že jeho prostorový náboj je přibližně roven nule (tuto vlastnost označujeme jako kvazineutralita). Částicemi se v této definici rozumí nejen elementární částice, jako jsou např. elektrony, ale také ionty, neutrální atomy, molekuly. Rozlišujeme plazma izotermické, pro které platí, že všechny typy částic mají stejnou teplotu, a neizotermické, ve kterém teplota elektronů převažuje nad teplotou ostatních typů částic. Vznik jednoho nebo druhého typu závisí především na způsobu, jakým byla plazmatu dodávána energie. Izotermicita bývá obvykle spojena s vysokou teplotou plazmatu, není to ale podmínkou. Platí však, že neizotermické plazma v přírodě samovolně zaniká, musí se tedy udržovat uměle[6].

Přeměna plynu na plazmu je provázena rozpadem velké části atomárních vazeb což má za následek ionizaci plynu. Procento ionizace se liší, u nízkoteplotního plazmatu to může být pouze 1-10% přičemž zbytek atomů zůstane neutrálních, naopak u vysokoteplotního plazmatu, které vzniká například při výzkumu jaderné fúze, dosáhne plazma úplné ionizace. [5]

Pokud mluvíme o vysokoteplotním a nízkoteplotním plazmatu, je třeba si uvědomit, že vlastnosti plazmatu jsou jiné než jsme zvyklí například u tekutin. Ty si zachovávají teplotně rovnovážný vztah, takže atomy či molekuly mají Maxwelllovo(Gaussovo) rozdělení rychlosti. Avšak v plazmatu k této teplotní rovnováze nedochází kvůli jeho relativně nízké hustotě, ionty, neutrony, nebo elektrony tak mohou mít různou teplotu. U studeného plazmatu je přesto možné, díky jeho nízkému stupni ionizace, určit Maxwelllovo rozdělení, velmi horké plazma toto rozdělení již mít nemusí a je třeba ho posuzovat na základě kinetické teorie plynů[5].

Jedním ze nejzajímavějších faktů o plazmatu je, že přestože se s ním na zemi běžně nesetkáváme, je mimo naši planetu počínaje ionosférou téměř 99% veškeré látky ve stádiu plazmatu. Je to dáno tím že ve vesmírném vakuu na sebe mohou elektrony v plazmatu působit i na velmi velké vzdálenosti a tak není potřeba vysoké hustoty k udržení skupenství a splnění jedné ze základních podmínek existence plazmatu, kterou je tzv. kolektivní chování.

Tab.1.1: Klasifikace plazmatu[2]

| Nízkoteplotní plazma                                    |  | Vysokoteplotní plazma                 |
|---|--|---------------------------------------|
| Izometrické   | Neizometrické  |                                       |
| $T_e \approx T_i \approx T \leq 2 \cdot 10^4 \text{ K}$ | $T_i \approx T \approx 300 \text{ K}$<br>$T_i \ll T_e \leq 10^5 \text{ K}$ | $T_i \approx T_e \geq 10^7 \text{ K}$ |
| obloukový výboj<br>pochodňový výboj                     | koróna<br>bariérový výboj<br>OAUGDP  | jaderná syntéza<br>magnetosféra       |

## 2.2 Základní charakteristiky plazmatu

### 2.2.1 Debyeho poloměr

Samotná existence plazmatu je podmíněna přítomností velkého množství volně se pohybujících nabitých částic, ovšem může obsahovat i neutrální částice, které mohou mít vliv na jeho vlastnosti. Nabitě částice v plazmatu musí vykazovat kolektivní chování. Toto chování lze popsat rovnicemi[1]:

$$r_D = \sqrt{\frac{T}{4\pi n_0 q^2}} \quad (2.1)$$

$$\Phi = \frac{Q}{r} \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right) \quad (2.2)$$

kde  $r_D$  je tzv Debyeův poloměr popisující vzdálenost v níž nedochází k odstínění náboje okolním plazmatem,  $n_0$  udává koncentraci elektronů a  $q$  je elementární náboj.  $\Phi$  je statisticky zprůměrovaný elektrický potenciál indukovaný testovacím nábojem  $Q$ , který jsme do systému přidali za účelem pozorování,  $r$  je vzdálenost od náboje  $Q$  [1].

Je zřejmé, že pro  $r \ll r_D$  je potenciál téměř neovlivněn částicemi plazmatu a odpovídá přibližně Columbovu potenciálu  $\Phi = Q/r$ . Avšak pro  $r > r_D$  potenciál klesá exponenciálně. Nabitě částice v plazmatu efektivně odstíní elektrické pole testovacího náboje vně Debyeovy sféry  $r = r_D$ . Tento jev se nazývá Debyeovo stínění a je jedním z projevů kolektivního chování částic v plazmatu. Částice v plazmatu se chovají společně tak, aby eliminovaly vliv externě přivedených nábojů. Tento efekt lze samozřejmě pozorovat jen v případě, že je Debyeova sféra podstatně menší než jsou rozměry systému  $r_D \ll L$ . To je také jedna z nutných podmínek, abychom plyn s nabitými částicemi mohli nazvat plazmatem [1].

Analýza Debyeova stínění popisuje pouze statické kolektivní chování. Pokud bychom chtěli analyzovat dynamické kolektivní chování, bylo by třeba uvážit driftový pohyb částic[1].

## 2.2.2 Stupeň ionizace

Další vlastností plazmatu může být stupeň ionizace. Jak již bylo řečeno, plazma může obsahovat i neutrální částice, které podléhají rozpadu na kladně nabitě ionty a záporné elektrony. Tento stupeň je vyjádřen poměrem iontů a atomů  $n_i / n_a$ . Pokud uvažujeme případ termodynamické rovnováhy, závisí poměr pouze na teplotě [1]. Tento vztah popisuje tzv. Sahaova rovnice:

$$\frac{n_i^1 n_e}{n_A} = \frac{2Z_i^1}{Z_A} \frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3} (kT)^{3/2} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{ion}}{kT}\right) \quad (2.3)$$

kde  $n_i^1$ ,  $n_e$  a  $n_A$  jsou koncentrace jednou ionizovaných atomů (iontů), elektronů a neutrálních atomů.  $Z_i^1$  a  $Z_A$  jsou statistické sumy odpovídající příslušným iontům a neutrálním atomům. Jestliže koncentraci původních neutrálních atomů označíme  $n$ , můžeme napsat následující vztahy[3]:

$$n_i^1 = \alpha \cdot n \quad n_A = (1 - \alpha) \cdot n \quad n_e = \alpha \cdot n \quad (2.4)$$

kde  $\alpha$  je stupeň ionizace. S využitím vztahu (2.3) pro něj platí: [3]

$$\alpha \approx \frac{n_e}{n_A} \approx 2,4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i^1} \exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{kT}\right) \quad (2.5)$$

Plazma jako takové považujeme za kvazineutrální, což znamená že  $n_i \approx n_e$ , tato podmínka je jedna z nejdůležitějších charakteristik plazmatu. Nabitě částice se vždy snaží uchovat nábojovou rovnováhu.

## 2.2.3 Plazmová frekvence

Důsledkem uchovávání nábojové rovnováhy dochází k tzv. plazmové oscilaci, jejíž frekvence  $\omega_p$  se vypočítá:[4]

$$\omega_p = \left( \frac{n_e e^2}{\varepsilon_o m_e} \right)^{1/2} \text{ rad/sec} \quad (2.6)$$

nebo také

$$f_p = 9 \sqrt{n (10^{12} \text{ cm}^{-3})} \text{ GHz} \quad (2.7)$$

Plazmová frekvence je charakteristikou kolektivního působení částic plazmatu. Má-li být kolektivní chování silnější než vzájemné působení mezi jednotlivými částicemi, musí být plazmová frekvence větší, než je počet srážek částic za sekundu [4]. Tato frekvence závisí pouze na hustotě plazmy[5].

Shrneme-li nejdůležitější vlastnosti do několika bodů, pak dostaneme:

- Přítomnost velkého množství volně se pohybujících nabitých částic.
- Částice v plazmatu musí vykazovat kolektivní chování.
- Odchylka od nábojové rovnováhy je minimální, aby plazma bylo kvazineutrální.
- Plazmová frekvence musí být větší než počet srážek za sekundu.

#### 2.2.4 Srážkové procesy

Elektrony jsou v plazmatu urychlovány účinkem vnějšího elektrického pole a jejich energie je přenášena pomocí srážek na ostatní částice, což vede k excitaci, ionizaci nebo disociaci těchto částic, jde-li o molekuly. Částice v metastabilních stavech mají relativně dlouhou dobu života (mikro až milisekundy), následkem čehož se mohou hromadit v plazmatu a jsou pak využity jako efektivní zdroj pro postupné excitační a ionizační procesy. Srážky s molekulami mohou vést ke vzniku volných radikálů, které se stávají prekurzory chemických reakcí v plazmatu. Chemické reakce v plazmatu probíhají v důsledku velkého počtu energetických srážek odlišně než za běžných podmínek. Proto nachází nízkoteplotní neizotermické plazma uplatnění zvláště v organické chemii při izomerizacích, polymerizacích a destrukcích materiálu, dále při depozicích vrstev, povrchových úpravách, při rozkladu látek atd. [7]. V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny vybrané hodnoty kinetických parametrů pro běžné plyny a vybrané srážkové procesy mezi elektrony a těžkými částicemi i těžkými částicemi navzájem[8].

Tab. 2.2: Kinetické parametry pro běžné plyny při  $T = 300 \text{ K}$  a  $p = 133 \text{ Pa}$  [8]

| plyn           | $M [\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}]$ | $\tilde{v} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $\lambda_{nn} [\mu\text{m}]$ | $v_{nn} [\text{MHz}]$ | $\lambda_i [\mu\text{m}]$ | $v_i [\text{MHz}]$ |
|----------------|--------------------------------------|--|------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| He             | 4,0                                  | 1255                                       | 207                          | 6,04                  | 82                        | 15,3               |
| Ne             | 20,2                                 | 559  | 148                          | 3,77                  | 69                        | 8,1                |
| Ar             | 39,9                                 | 398  | 74                           | 5,38                  | 33                        | 11,9               |
| O <sub>2</sub> | 32,0                                 | 444  | 76                           | 5,87                  | 56                        | 7,8                |
| N <sub>2</sub> | 28,0                                 | 474  | 71                           | 6,71                  | 37                        | 13,0               |
| CO             | 28,0                                 | 474  | 69                           | 6,88                  | 31                        | 15,5               |

$M$  - molekulová hmotnost,  $\tilde{v}$  - střední tepelná rychlost,  $\lambda_{nn}$  - střední volná dráha neutrálních částic,  $v_{nn}$  - srážková frekvence mezi neutrálními částicemi,  $\lambda_i$  - střední volná dráha iontů,  $v_i$  - srážková frekvence iontů[8]

### 3 Elektrické výboje v plynech

Elektrickým výbojem v plynu nazýváme všechny jevy, při nichž se plyn nebo pára stávají elektricky vodivým. Znamená to, že v plynu nebo páře jsou volně pohyblivé elektricky nabitě částice (ionty, elektrony). Elektrický proud má v důsledku přítomnosti elektrického nebo magnetického pole vliv na pohyb nabitých částic, který se stane uspořádaným a převládne tak nad přirozeným (náhodným) pohybem částic v plynu (páře). Přítomnost elektricky nabitých částic a následně průchod proudu závisí na mnoha faktorech (např. konfigurace elektrod, tvar a velikost výbojového prostoru, druh a tlak plynu ve kterém nastává výboj atd.), podle kterých je možno rozlišit různé druhy elektrických výbojů[1]

- výboje při stejnosměrném proudu
- výboje při střídavém proudu
- vysokofrekvenční výboje
- výboje při nízkém/vysokém tlaku
- pulsní výboje
- atd

Nejvýraznější vlastností elektrického výboje je vyzařování elektromagnetického vlnění v oboru viditelné části spektra (avšak i IR a UV). Tato vlastnost byla využita k osvětlovacím účelům a vůbec první osvětlení na bázi elektrické energie bylo realizováno právě pomocí elektrického výboje v plynu. V dnešní době se tohoto jevu využívá zejména v zářivkách a sodíkových lampách veřejného osvětlení[1].

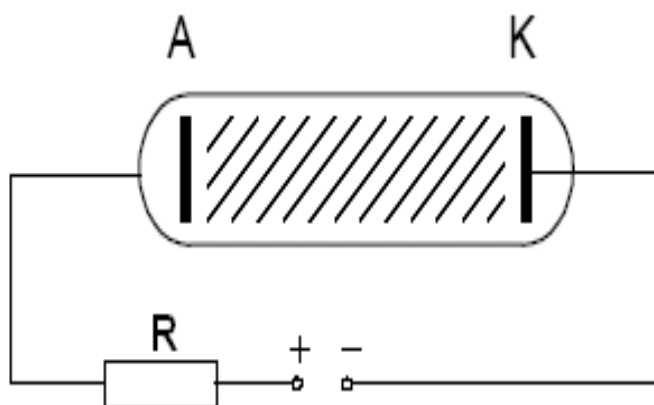
Již v počátcích výzkumu elektrických výbojů se zjistilo (nejdříve u bleksu), že některé druhy výboje, především jiskra, jsou zdroji elektromagnetického záření v oboru frekvencí, které se dnes využívají ve sdělovací technice[1].

Jiné využití našly výboje o vysokých teplotách v průmyslu, jako například plazmové hořáky v řezačkách nebo obloukové sváření. Bariérový výboj také našel své uplatnění, kromě jiného, v nanášení tenkých vrstev na kovy atd. Budoucnost plazmatu lze vidět hlavně v řízené termionukleární reakci nebo v iontovém pohonu pro vesmírný výzkum, který již byl úspěšně otestován.[1]

### 3.1 Základní typy elektrických obvodů pro tvorbu plazmatu

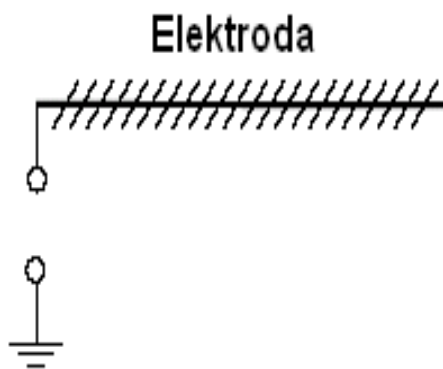
Pokud zjednodušíme elektrický obvod, ve kterém probíhá elektrický výboj, lze definovat tři typy takového obvodu:

- 1) První je klasický obvod s vloženou anodou a katodou v trubici obsahující plyn nebo vakuum. Jestliže trubice obsahuje vakuum, je nutné, aby anoda nebo katoda byla schopna emitovat nosiče elektrického náboje[1].



Obr. 3.1: Zjednodušená ukázka obvodu pro tvorbu výboje[1]

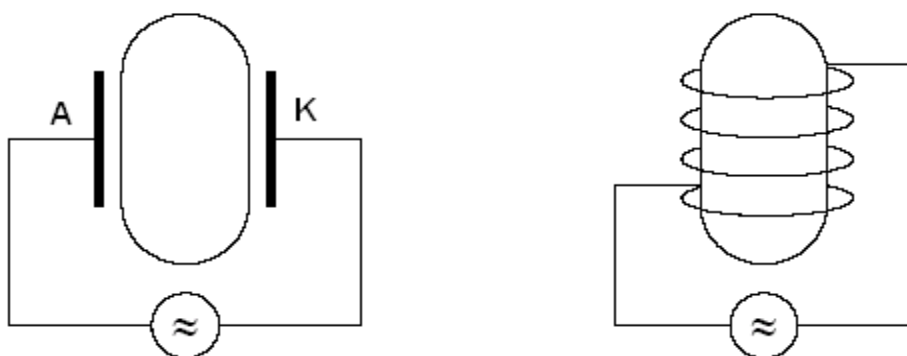
- 2) Druhým typem je neuzavřený obvod při kterém na neuzemněném vodiči (elektrodě) s dostatečně vysokým napětím vznikne tzv. korónový nebo pochodňový výboj[1].



Obr. 3.2: Zjednodušená ukázka obvodu pro tvorbu výboje[1].



- 3) Poslední typ výboje je tzv. bezelektrodový, což znamená, že v trubici naplněné plynem nejsou vloženy elektrody (jsou umístěny vně trubice) nebo že trubice tvoří pomyslné jádro cívky a vzniklý výboj lze přirovnat k jevu v transformátoru, kde cívka představuje primární vinutí a výboj proud v sekundárním vynutí[1].



Obr. 3.3: Zjednodušená ukázka obvodu pro tvorbu výboje[1].

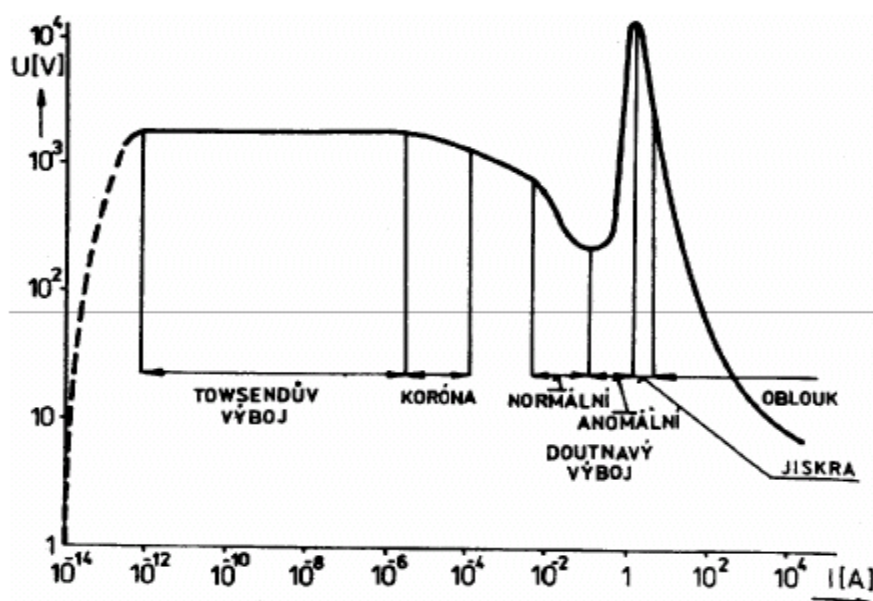
## 3.2 Rozdělení výbojů

Podle makroskopických projevů, ovlivňovaných různými jevy, dělíme elektrické výboje na několik hlavních typů. Podle doby trvání rozdělujeme výboje na přechodné a ustálené. V každém elektrickém výboji teče elektrický proud. Podmínky určující charakter tohoto elektrického proudu jsou velmi rozdílné. Základní rozdělení výbojů na nesamostatné a samostatné provádíme podle toho, zda je nebo není k tvorbě nabitých částic, a tím i vzniku elektrického proudu, třeba tzv. ionizační činidlo. Ionizačním činidlem může být např. proud elektronů vystupujících ze žhavé katody, ozařování výbojového prostoru rentgenovými paprsky, ozařování katody UV paprsky atd. Nesamostatný výboj přestane při přerušení působení ionizačního činidla existovat[1].

Pokud může elektrický výboj vzniknout a existovat i bez působení ionizačního činidla, nazýváme jej samostatným[1]. Mezi tyto výboje patří i bariérový výboj, který je hlavním předmětem této práce.

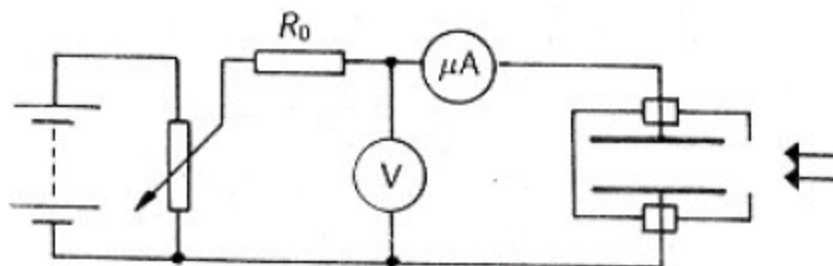
### 3.3 Charakteristika výboje

Závislost napětí na elektrodách na proudu protékajícím výbojem nazýváme charakteristikou výboje. Charakteristika stacionárních výbojů je schematicky znázorněna na obrázku. Podle velikosti proudu tekoucího plazmatem rozdělujeme stacionární výboje na tři druhy: temný výboj, doutnavý výboj a oblouk. Charakteristika na obrázku je pouze přibližná, jsou v ní pouze řádové velikosti napětí a proudu. Jejich skutečná velikost je funkcí jednotlivých paramterů výbojů[1].

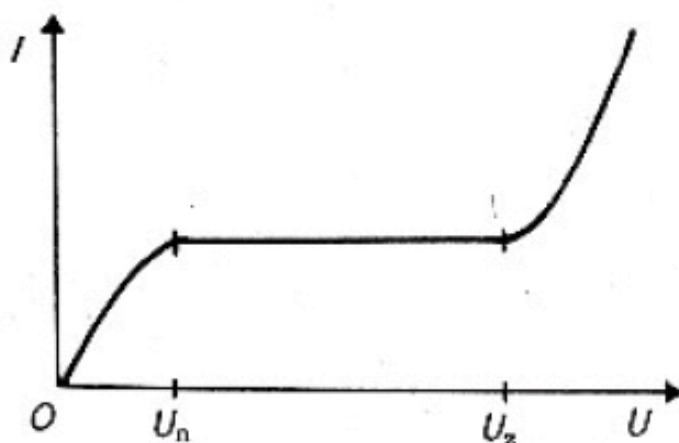


Obr 3.4: Obecná charakteristika výbojů [1]

Voltampérovou charakteristiku lze měřit v tzv. ionizační komoře (deskový kondenzátor, do jehož prostoru mezi deskami vniká ionizační záření, v závislosti na napětí mezi deskami se měří proud procházející výbojem viz obrázek 3.5), výsledná závislost je na obrázku 3.6. [9]



Obr 3.5: Zapojení pro měření v ionizační komoře[9].



Obr. 3.6: Výsledná závislost měření pomocí ionizační komory[9].  $U_n$  hranice nasycenosti  
 $U_z$  zápalné napětí

V závislosti na napětí  $U$  lze rozlišit tři odlišné části křivky:

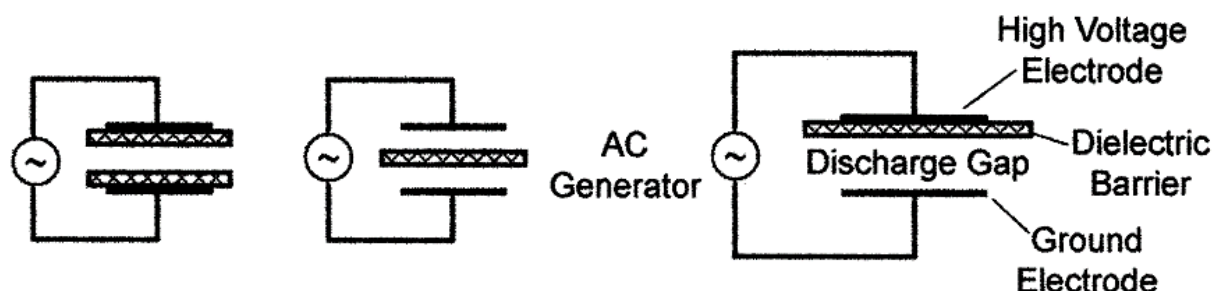
- 1) Pokud je  $U < U_n$  zanikne většina iontů vlivem rekombinačního procesu dříve než dorazí na elektrody. Počet iontů schopných předat náboj je tak přímo úměrný napětí a platí zde Ohmův zákon[9].
- 2) Při napětí  $U \geq U_n$  se všechny ionty a elektrony podílejí na přenosu proudu (mají takovou rychlost, že se nestačí rekombinovat) a proud se s rostoucím napětím nezvyšuje, nastává nasycený stav kdy pro proud již neplatí Ohmův zákon[9]. V tomto stavu je výboj nesamostatný
- 3) Pokud napětí dosáhne hodnoty  $U \geq U_z$  nastane ionizace nárazem. Ionty a elektrony jsou urychleny natolik, že při nárazu na neutrální molekulu ji ionizují. Počet ionizovaných molekul v plynu lavinovitě narůstá, což má za následek prudký nárůst proudu. Výboj se stává samostatným. Velikost  $U_z$  závisí na tlaku a druhu plynu[9].

## 4 Bariérový výboj

První zmínky o využití dielektrických bariérových výbojů byly publikovány Wernerem von Siemensem v roce 1857 [10], výzkum byl zaměřen na využití DBD pro generování ozónu. Vedle toho však postupem času našel DBD výboj také uplatnění při řadě dalších průmyslových aplikací jako jsou CO<sub>2</sub> lasery, excimerní UV lampy, plazmové dispeje, ale také při povrchových úpravách materiálů včetně nanášení tenkých vrstev [11]. Výhodou tohoto typu výboje je relativně snadný přechod z laboratorního měřítka k velkým průmyslovým aplikacím. Pro průmysl důležitou vlastností je i možnost používat tuto technologii při nízkých teplotách a atmosférickém tlaku. [2].

### 4.1 Princip

Bariérový výboj je charakterizován přítomností jedné nebo více pevných dielektrických bariérových vrstev umístěných mezi kovovými elektrodami (viz obrázek 3.3). Dielektrická bariéra kontroluje distribuci náboje a energii mikrovýbojů na povrchu elektrody. Nejčastěji je materiálem dielektrika sklo, křemičité sklo, keramické nebo polymerní materiály. Bariérový výboj může vznikat v širokém rozmezí tlaků, nejčastěji však při tlacích 0,1 - 1 atmosféra. Vzhledem k přítomnosti nevodivé bariérové vrstvy je výboje buzen střídavým napětím. Napětí mezi elektrodami je obvykle v rozsahu 1 - 100 kV. Frekvence se pohybuje v intervalu desítek Hz - MHz. Prostor mezi elektrodami se většinou pohybuje v rozmezí několika desetin mm až k několika cm v závislosti na požadované aplikaci [1].



Obr. 4.1: Základní experimentální uspořádání dielektrických bariérových výbojů [11]. AC generator - zdroj střídavého napětí, discharge gap - prostor mezi elektrodami, dielectric barrier - dielektrická bariéra, high voltage electrode - vysokonapěťová elektroda, ground electrode - uzemněná elektroda.

Dielektrický bariérový výboj získáme, jestliže k dvojici elektrod, mezi nimiž se nachází dielektrická bariéra, připojíme vysoké střídavé napětí s amplitudou větší než je průrazné napětí plynu mezi elektrodami. Dielektrická bariéra zde slouží jako sériově připojený kondenzátor, který omezuje elektrický proud v prostoru mezi elektrodami. Elektrický průraz v plynu způsobí lokální nabíjení bariéry, což má za následek pokles napětí v plynu. To tedy po velmi krátké době (řádově desítky nanosekund) klesne pod průrazné napětí plynu a výboj zanikne. K dalšímu výboji může dojít pouze zvýšením přiloženého napětí nebo změnou jeho polaritu, což je důvod, proč se pro napájení bariérového výboje používá střídavé napětí [11].

Za atmosférického tlaku se DBD ve většině případů vyskytuje v tzv. filamentárním módu. V tomto stavu má výboj podobu velkého množství výbojových kanálů, tzv. filamentů. Každý z těchto filamentů je prostorově výrazně ohraničen, přičemž jeho průměr bývá řádově desetiny milimetru a trvání od několika nanosekund po jednotky mikrosekund [11]. Vlastnosti jednoho filamentu nejsou příliš závislé na vlastnostech (amplituda, frekvence) přivedeného napětí. Jsou dány pouze vlastnostmi použitého plynu, dielektrika a konfigurací elektrod. Velikost amplitudy napětí má vliv pouze na množství vznikajících filamentů. Nezávislost vlastností filamentů na vlastnostech elektrického pole přestává platit, pokud je doba nárůstu napětí srovnatelná s dobou trvání filamentu. Značnou nevýhodou filamentárního módu je jeho nehomogenita. Využitelnost filamentárního výboje je tak omezena na procesy s nižšími nároky na homogenitu výboje [12]. Pro přehled některých vlastností mikrovýbojů jsou shrnuty v tabulce č. 4.1.

Tab 4.1: Vlastnosti mikrovýbojů [11].

|                   |  |
|-------------------|--|
| Trvání            | 1 - 10ns                                 |
| Průměr            | ≈0,1mm                                   |
| Maximum proudu    | 0,1A                                     |
| Hustota proudu    | 100 - 1000 A.cm-2                        |
| Náboj             | 0,1 - 1nC                                |
| Hustota elektronů | 10 <sup>14</sup> – 10 <sup>15</sup> cm-3 |
| Energie elektronů | 1 - 10eV                                 |
| Teplota           | blízká teplotě okolí                     |

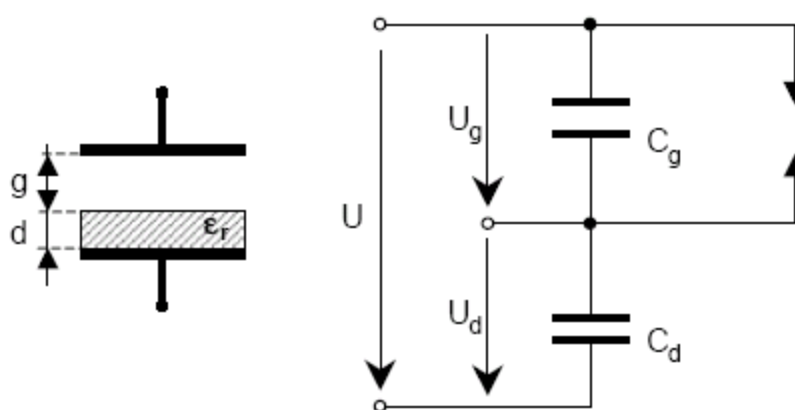
Za určitých podmínek (plyn, frekvence, napětí, případně konfigurace elektrod) lze získat zdánlivě homogenní difúzní mód DBD [11]. V tomto módu není možné přímo rozlišit jednotlivé filameny, výbojový kanál pokrývá prakticky celou plochu dielektrika. Také trvání tohoto výboje je podstatně delší, řádově desítky až stovky mikrosekund. Jednotlivé typy výboje tak lze od sebe rozlišit sledováním časového průběhu výbojového proudu. Výhodou je

již zmiňovaná homogenita výboje, hlavní nevýhodou je pak fakt, že difúzní výboj vzniká jen v některých plynech nebo směsích plynů a jen v určitém rozsahu napětí a frekvencí. Na jeho vznik může mít také vliv prostorové uspořádání elektrod [12].

Filamentární mód je stále předmětem výzkumu kvůli své složitosti. Hlavním problémem je studium dynamiky jednotlivých filamentárních výbojů. V současné době existuje celá řada prací, ve kterých jsou shrnuty nejdůležitější parametry odpovědné za vznik a průběh bariérového výboje s popisem základního vybavení potřebného k jejich měření, např. [2,11]. Nedávné výsledky experimentálního výzkumu filamentární dynamiky byly získány technikou křížově-korelační spektroskopie. Tyto experimenty umožnily určení lokálních plazmových parametrů pro bariérový výboj právě ve filamentárním módu. Podmínky pro vznik difusního módu v určitých mediích jsou stále předmětem diskuze[2].

## 4.2 Filamentární mód

Nejčastěji se bariérový výboj vyskytuje právě ve filamentárním módu. Jakmile elektrické pole na elektrodách dosáhne kritické hodnoty, začne docházet k průrazům po celé ploše mezi elektrodou a dielektrikem následované vznikem filamentů, tedy mikro-výbojů. Doba trvání těchto výbojů je velmi malá, řádově nanosekundy. K popsání tohoto chování lze použít ekvivalentní elektrický obvod (viz obr. 4.1) pro případ jedné dielektrické bariéry [2].



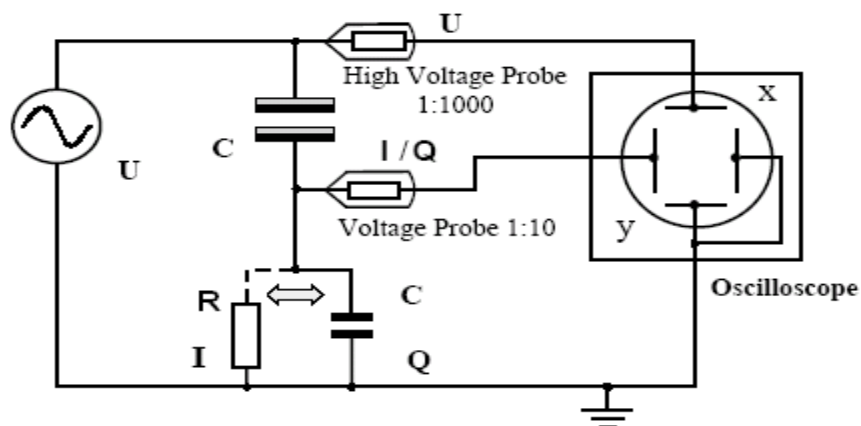
Obr 4.1: Ekvivalentní elektrický obvod (k zobrazené konfiguraci elektrod s dielektrikem) pro tvorbu bariérového výboje.

Po dobu, kdy je napětí v mezeře  $U_m$  menší než kritické napětí, nedochází k žádnému výboji a obvod se chová jako dva kondenzátory v sériovém zapojení.. Kapacita mezery je  $C_m$  a kapacita dielektrika  $C_d$ . Celková kapacita  $C$  je pak vyjádřena [2]:

$$C = \frac{C_d C_m}{C_d + C_m} = \frac{C_m}{1 + C_d/C_m} = \frac{C_m}{1 + d/(\epsilon_r g)} [F] \quad (4.1)$$

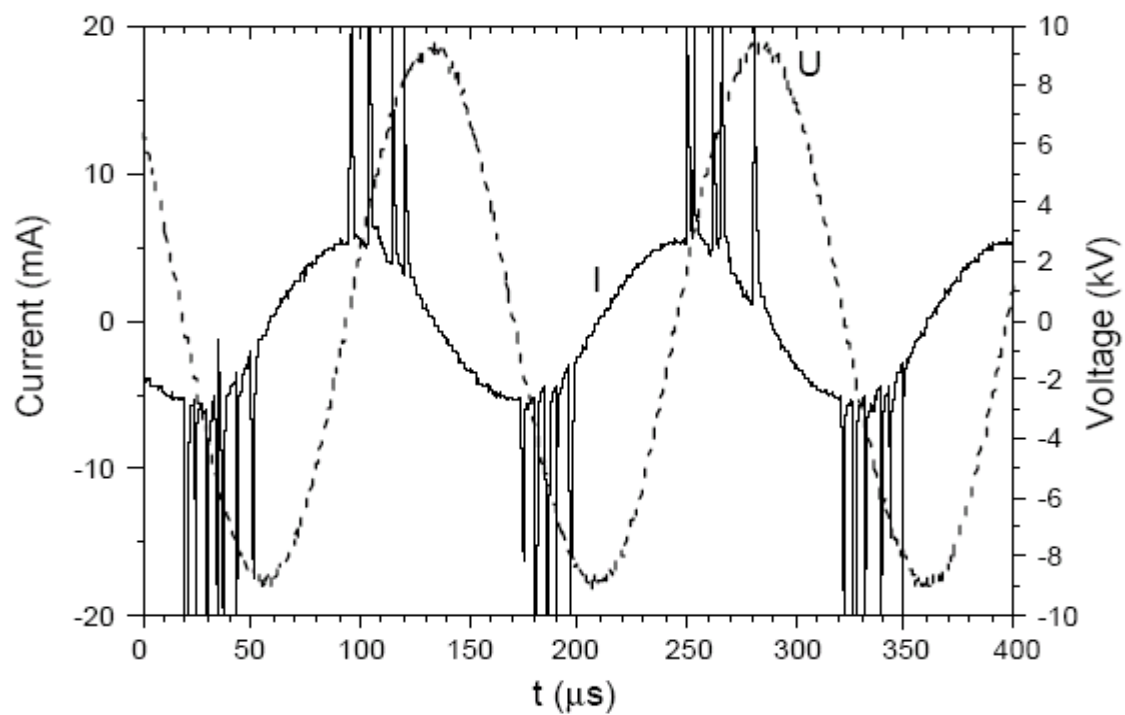
Uvažujeme dielektrikum sklo:  $\epsilon_r = 5 - 10$  a  $g \approx d$ , vznikne úprava vzorce (4.1):  $C_m/C_d = d/\epsilon_r g \approx U_d/U_g \ll 1$  ( $U_d$ : napětí napříč dielektrickou bariérou). Proto celková kapacita  $C$  je řízena kapacitou mezery  $C_m$ . Napětí v mezeře se blíží nasycenému napětí  $U(t)$ . Pokud napětí v mezeře překoná kritickou hranici, začnou mikro-výboje. V této fázi ( $t_1 \dots t_2$ ) v každém půlcyklu výbojové napětí  $U_d$  zůstává přibližně konstantní,  $U_g = U_d \approx \text{konst}$ , přestože momentální tok skrze výbojovou mezeru je řízen velkým počtem mikro-výbojů. Napětí  $U_d$  závisí především na složení plynu, tlaku a šířce mezery [2].

Důležité elektrické parametry jsou hlavně: výbojové napětí  $U_d$ , výbojový proud  $I(t)$ , přenesený náboj  $Q$ , elektrický příkon  $P_{el}$ , průměrná redukováná síla pole  $E/p$  [2]. Tyto hodnoty mohou být určeny v zapojení na obrázku 4.2. Bariérový výboj nahrazený kondenzátorem  $C$  je napájen proměnným napětím  $U(t)$ . Tvar proudového pulzu  $I(t)$  a  $(Q-U)$  náboj-voltové charakteristiky lze měřit alternativně použitím buď odporu  $R$  ( $R \approx 50\Omega$ ) nebo kondenzátoru  $C$  ( $C \approx 10\text{nF}$ ) prostřednictvím osciloskopu se sondou s velmi vysokým poměrem transformace, až 1:1000 [2].

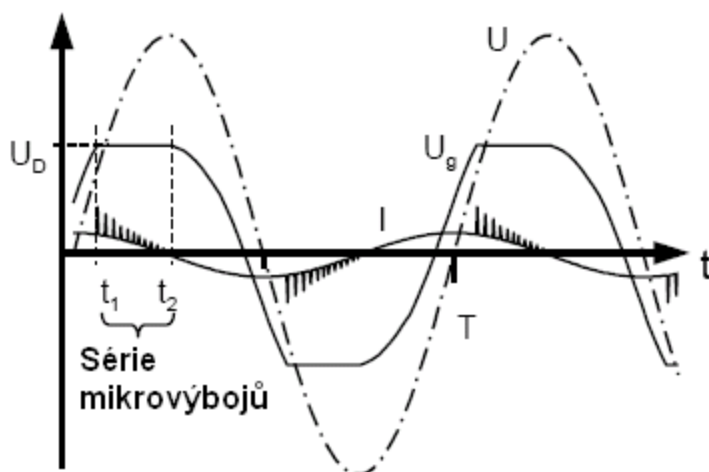


Obr 4.2: Experimentální zapojení pro měření napětí, proudu a přenosu náboje alternativní cestou – použitím buďto pouze odporu  $R$  pro měření proudu, nebo měření přeneseného náboje za použití pouze kondenzátoru  $C$  [2].

Při měření osciloskopem za použití metody na obrázku 4.2 lze očekávat podobné vyobrazení jako na obrázku 4.3, jde o zobrazení vybíjecího proudu ve vzduchu pro sinusový průběh napájecího napětí  $U(t)$ . Každý proudový impuls odpovídá sérii mikrovýbojů, jak je znázorněno na obrázku č.11[2].



Obr. 4.3: Měření napětí a momentálního tvaru filamentárního módu bariérového výboje ve vzduchu [2]. Current – proud, Voltage – napětí,  $t$  – čas[2].



Obr 4.4: Schématické znázornění napájecího napětí  $U(t)$  a výbojového proudu  $I(t)$  [2].

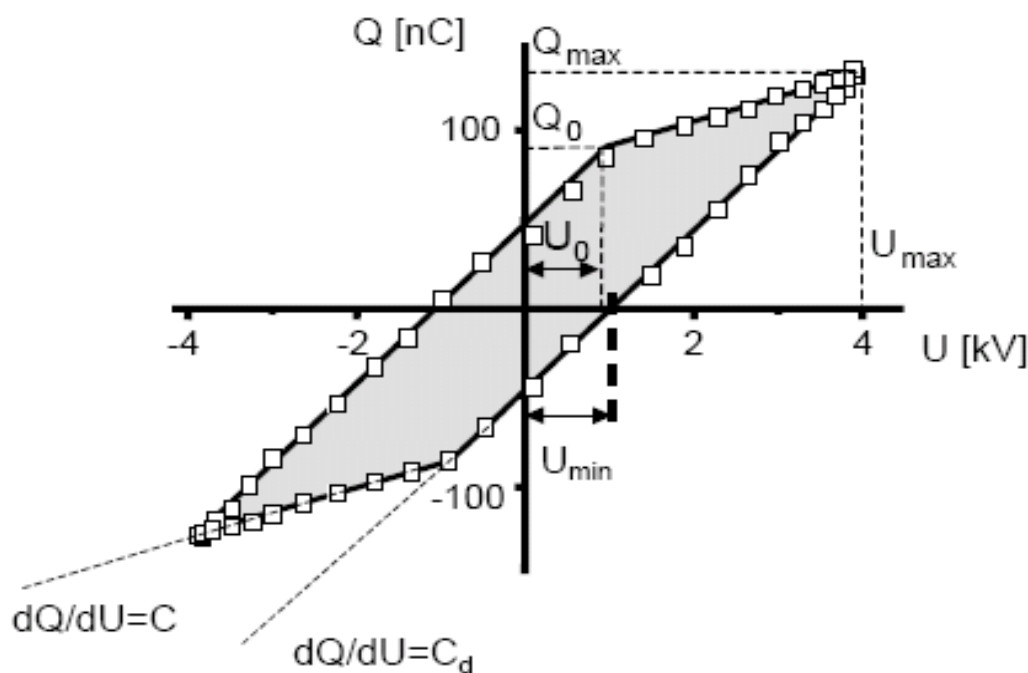


Druhou možností je zobrazení  $Q-U$  charakteristiky. Ta je na obrázku 4.4 a je v ní vyznačeno minimální napětí  $U_{min}$ , při kterém dojde k zažehnutí výboje. Dále je možno určit množství spotřebované energie  $E_{el}$  výpočtem plochy  $Q-U$  charakteristiky a z ní následně elektrický příkon  $P_{el}$ , kde  $f$  je frekvence napájecího napětí[2]:

$$P_{el} = \frac{1}{T} E_{el} = f E_{el} [J] \quad (4.2)$$

Určit prostorově a časově způměrovanou redukovanou sílu elektrického pole lze vypočítat jako [4.3], kde  $U_d$  je vybíjecí napětí:

$$\langle E/p \rangle = U_d / (gp) \quad (4.3)$$



Obr. 4.5:  $Q-U$  charakteristika (Lissajousovo zobrazení)[2].

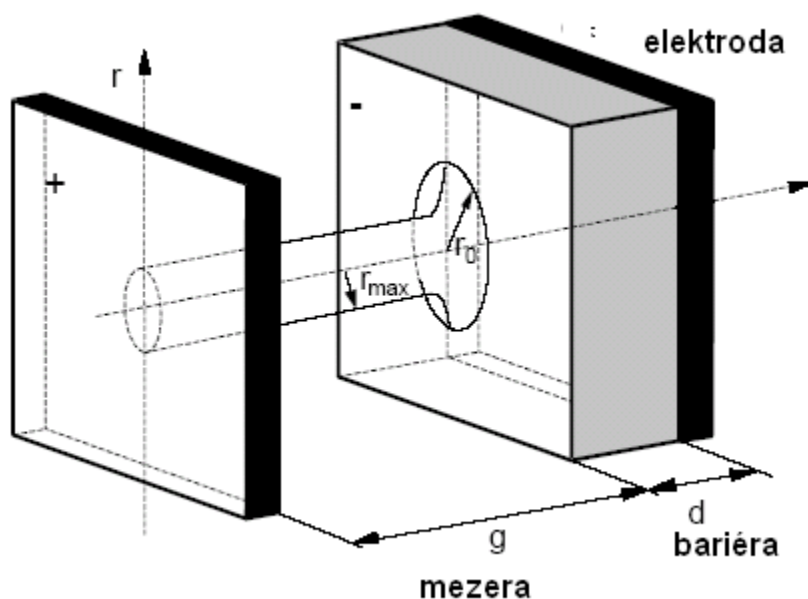
#### 4.2.1 Chování filamentárního výboje v mikroskopickém měřítku

Postupný vývoj filamentárního výboje lze rozdělit do několika základních kroků. Prvním krokem je fáze před průrazem. Záporné částice se začnou shlukovat před anodou v závislosti na momentální polaritě použitého napájecího napětí. Trvání této fáze je minimálně  $5\mu\text{s}$ . Jakmile elektrické pole dosáhne kritické hranice v okolí anody, dojde k průrazu z povrchu anody[2].

Druhým krokem je vznik ionizační vlny, která postupuje směrem ke katodě a má za následek tvorbu páru iontů a elektronů, její trvání bývá v rozmezí 1-2ns[2].

Posledním krokem je akumulace náboje na povrchu dielektrika kompenzujícího vnější elektrické pole. Je to fáze slábnutí světelných a proudových pulzů mikrovýbojů[2].

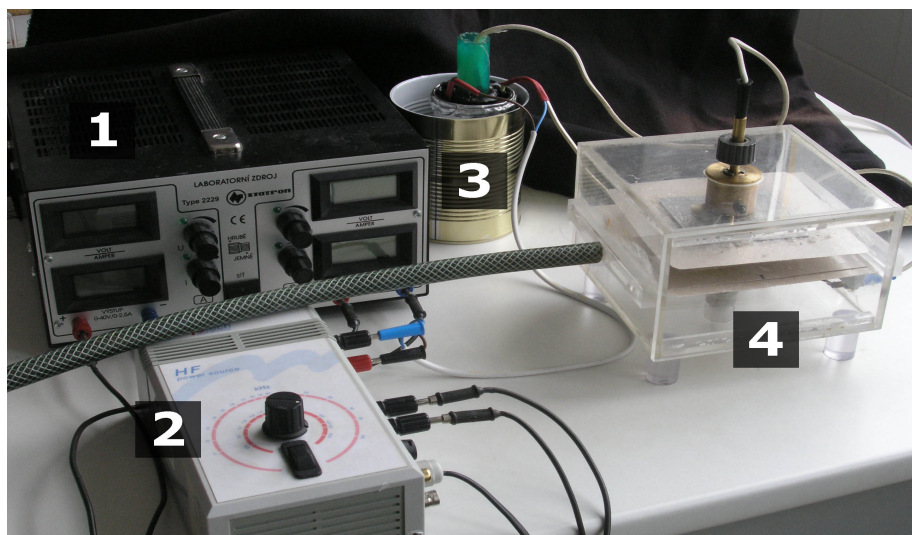
V dalším půl-cyklu aplikovaného napětí se formace mikrovýbojů inverzně obnoví. Na povrchu dielektrika pokračují mikrovýboje jako výboje povrchové, pokrývající mnohem větší oblast než je průměr filamentu jehož typický tvar je na obrázku 4.6[2]



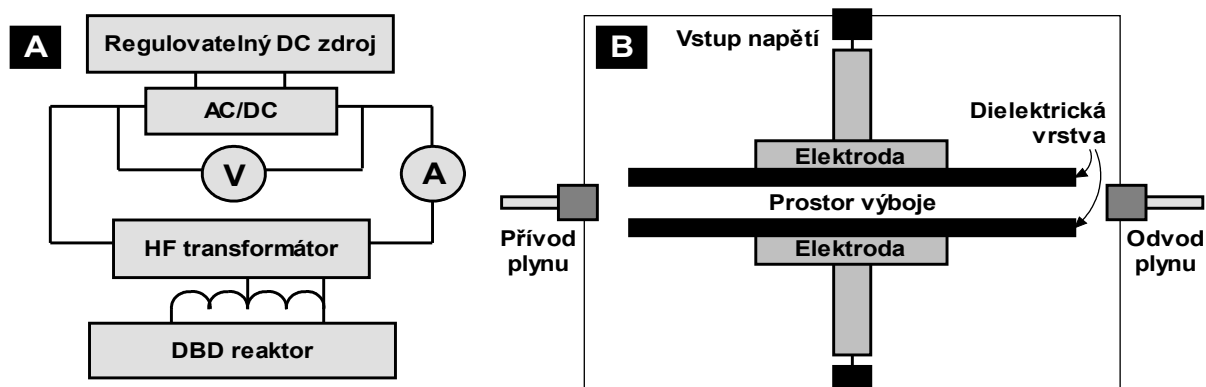
Obr. 4.6: Tvar mikrovýboje ( $r_{\max}$  – poloměr filamentu,  $r_0$  – poloměr otisku)

## 5 Experimentální zařízení

Experimentální aparatura je založena na principu objemového dielektrického bariérového výboje. Plazmové zařízení (obrázek 5.1) se skládá z regulovatelného zdroje stejnosměrného (DC) napětí, vysokofrekvenčního zdroje, vysokonapětového (HF) autotransformátoru a samotného DBD reaktoru. Výboj je generován mezi dvěma kovovými elektrodami pokrytými dielektrickou bariérovou vrstvou. Napětí mezi elektrodami lze při daném uspořádání měnit v rozsahu 3 - 10 kV, s frekvencí do 10 kHz. Vnější rozměry DBD reaktoru jsou  $120 \times 118 \times 120 \text{ mm}^3$ . Objem výboje je pak dán plochou elektrod  $80 \times 100 \text{ mm}^2$  a jejich vzdáleností. Vzdálenost elektrod lze pomocí šroubu měnit v závislosti na použitém pracovním plynu. Jako materiál dielektrika je použita slída, tloušťka vrstvy je 0,5 mm. Na obrázku 5.2 je zobrazeno schéma el. obvodu a reaktoru.



Obr. 5.1.: Plazmové zařízení: 1/ regulovatelný zdroj stejnosměrného napětí; 2/ vysokofrekvenční zdroj; 3/ vysokonapětový (HF) transformátor a 4/ DBD reaktor.



Ob 5.2: A/ Schéma el. obvodu; B/ Schéma DBD reaktoru.

## 6 Cíl měření

Hlavním cílem této práce bylo provést a následně vyhodnotit sérii praktických měření na experimentálním zařízení (viz. kapitola č.5). Měření bylo provedeno při použití dvou nosných plynů, o rychlosti průtoku 3 litry za minutu – argonu a dusíku, přičemž pro každý z nich bylo použito napájecí napětí o třech různých frekvencích. Pro srovnání vlivu rychlosti průtoku plynu mezi elektrodami na naměřená data bylo provedeno jedno měření při průtoku argonu 5 litrů za minutu. Další proměnné, které mají vliv na výstupní naměřená data a tedy i vlastnosti vzniku, průběhu a zániku bariérového výboje, jsou – vzdálenost elektrod a doba ponechaná pro ionizaci plynu, kterou jsem určil na 30 sekund pro všechna měření. V následující tabulce jsou přehledně uvedeny podmínky pro jednotlivá měření.

Tab 6.1: Nastavení parametrů pro jednotlivá měření

|                      | 4kHz   | 6kHz          | 8kHz   | 8kHz   |
|----------------------|--------|---------------|--------|--------|
| Argon                | 3l/min | 3l/min        | 3l/min | 5l/min |
| Dusík                | 3l/min | 3l/min        | 3l/min | N/A    |
| vzdálenost elektrod: |        | pro Argon 3mm |        |        |
|                      |        | pro Dusík 4mm |        |        |

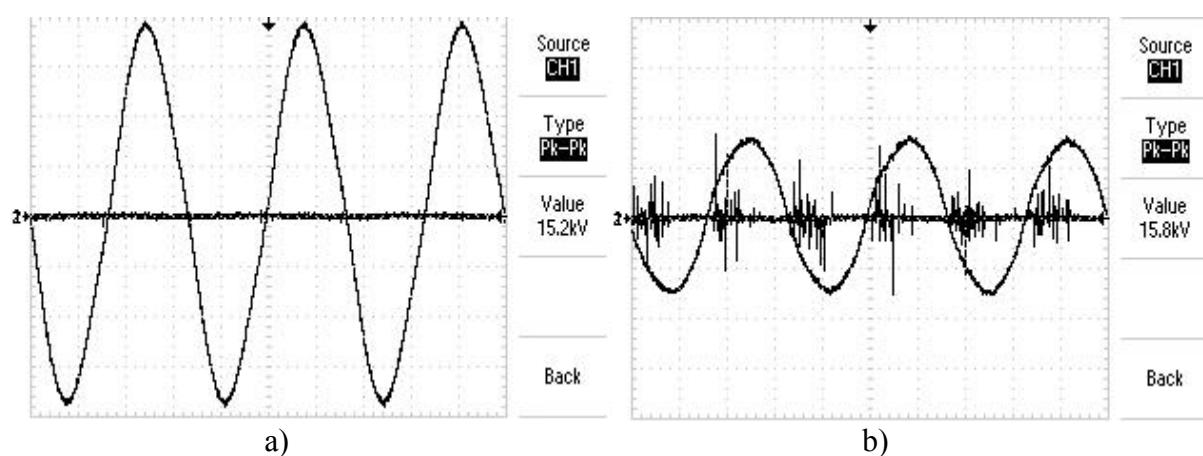
Výsledná data lze interpretovat přímo do volt-ampérových charakteristiky s časovou osou. Dalším zpracováním získáme hodnoty okamžitého výkonu pro každou konfiguraci, a hlavně  $Q-U$  charakteristiky, tedy dynamické charakteristiky bariérového výboje, pomocí kterých určíme energetické poměry ve výboji.

### 6.1 Postup měření

Před samotným měřením bylo nutné připojit k aparatuře osciloskop s jedním kanálem určeným k měření frekvence a napětí za vysokonapěťovým transformátorem a druhým k měření proudových výbojů mezi elektrodami. Zde bylo nutné použít sondu s převodním poměrem 1:1000. Samotný proud pak lze snadno vypočítat za pomoci předřadného odporu ( $1,6\Omega$ ). Následuje připojení bomby s požadovaným plynem k reaktoru a nastavením rychlosti průtoku. Po zapnutí regulovatelného zdroje stejnosměrného napětí a nastavení požadované frekvence na vysokofrekvenčním zdroji je třeba určit přibližné minimální napětí pro zapálení výboje. Jednoduše pomocí postupného zvyšování napětí na zdroji stejnosměrného napětí do bodu, kdy se na osciloskopu začnou objevovat první náznaky filamentárních výbojů. Jejich přítomnost lze ověřit i vizuálně náhledem přímo mezi elektrody. To samozřejmě není přesná

metoda, přesto se občas stává, že na osciloskopu už jistě náznaky výbojů jsou a vizuálně k žádným nedochází. To je dáno neustálým přeskupováním iontů (proces ionizace) v plynu, čímž neustále dochází k přenosům energie, kterou osciloskop zaznamenává. Mnohem užitečnější se vizuální metoda ukázala při ověřování, zda dochází k filamentárním výbojům nebo již nastal diffusní mód (zdánlivě homogení výboj, viz. kapitola 4.2).

Po zjištění přibližného  $U_{\min}$  (minimální napětí pro zapálení výboje) a zaznamenání této hodnoty, nastavíme napětí na 0 a necháme plyn 30 sekund „deionizovat“ (zda došlo k úplné obměně plynu za neionizovaný nelze zjistit, proto jsem jako referenční hodnotu pro obměnu ionizovaného plynu za „čerstvý“ určil konstatních 30 sekund stejně jako pro jeho ionizaci, která samozřejmě také nastává v různých časových intervalech). Po uběhnutí 30 sekund jsem nastavil stejnosměrné napětí vždy o 2V níže než původně zjištěné  $U_{\min}$  a odpočítal 30 sec., po uběhnutí tohoto intervalu jsem na osciloskopu uložil momentálně měřené hodnoty na flash disk a opět nechal 30sec. generátor bez napětí. Takto jsem opakoval postup, pokaždé se zvýšením hodnoty stejnosměrného napětí o 2V, až do momentu, kdy k výboji došlo okamžitě po nastavení napětí. Po dosažení této hranice jsem napětí o 2V (u argonu o 4V) snižoval, tentokrát však bez snížení napětí na 0V po dobu 30sec až do momentu, kdy podle hodnot na osciloskopu nedocházelo k žádným výbojům. To mělo za následek, že k zapálení výboje docházelo i při nižších hodnotách napětí (nebo stejných, kde původně k zapálení nedošlo), než u měření „směrem nahoru“. Pro objasnění tohoto jevu stačí porovnat následující dva obrázky přímo z osciloskopu, na nichž je zobrazena  $V$ - $A$  charakteristika v čase pro přibližně stejné hodnoty napětí, avšak jedna zobrazuje měření při postupném zvyšování napětí a druhá při snižování.

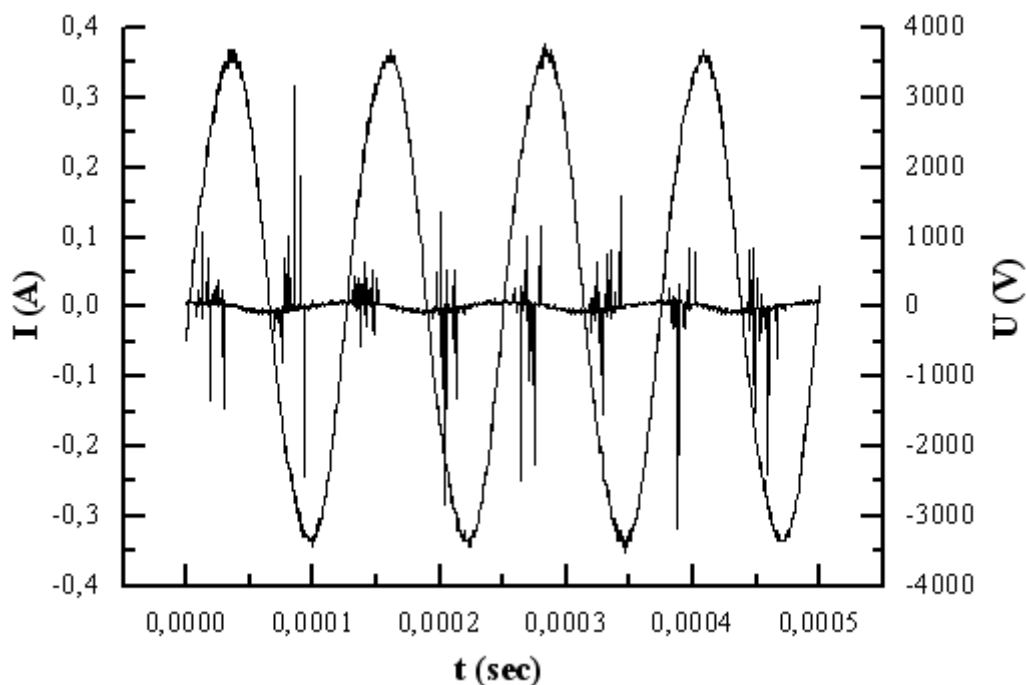


Obr. 6.1

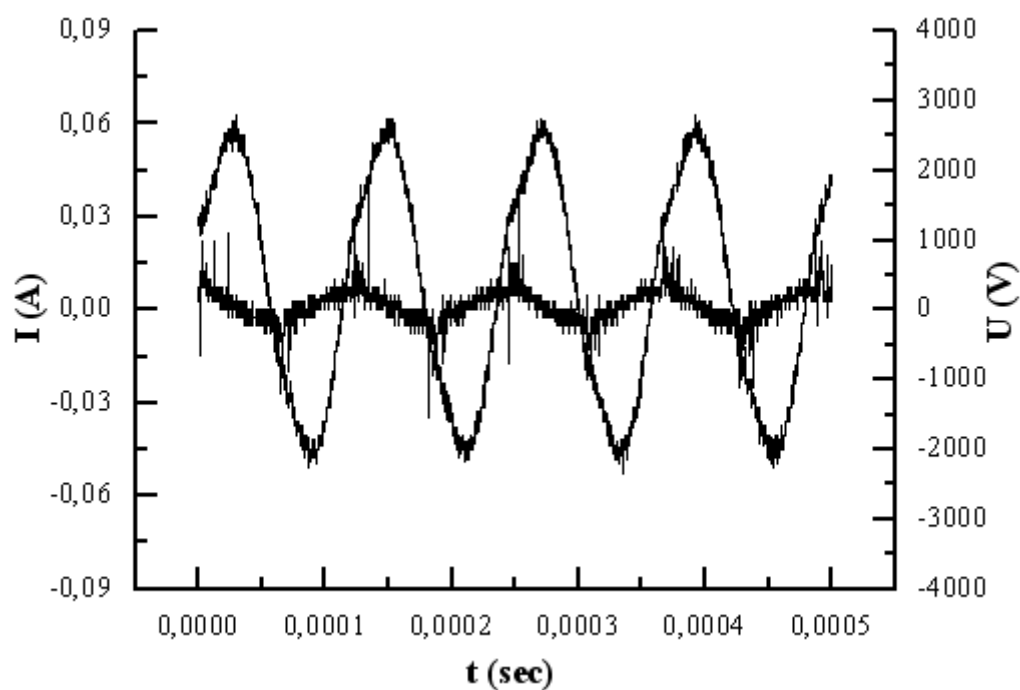
Na obr. č. 6.1a) je zobrazeno napětí s amplitudou 7,6kV o frekvenci 6kHz. Nosným plynem je dusík s průtokem 3l/min. Lze jasně vidět že k žádným výbojům nedochází, jedná se o první měření s tímto nastavením po zjištění přibližného  $U_{min}$ . Na obr. č. 6.1b) jde již o předposlední měření stejné konfigurace, nicméně „směrem dolů“. Je zde jasně vidět množství výbojů značících, že došlo k zažehnutí, na rozdíl od prvního měření, rozdíl amplitudy 0,3kV je zanedbatelný. Je zde tedy jasně vidět, že již ionizovaný plyn má dle očekávání lepší vlastnosti pro okamžitý přenos náboje a to i při nízkých hodnotách napětí.

## 6.2 Naměřené hodnoty

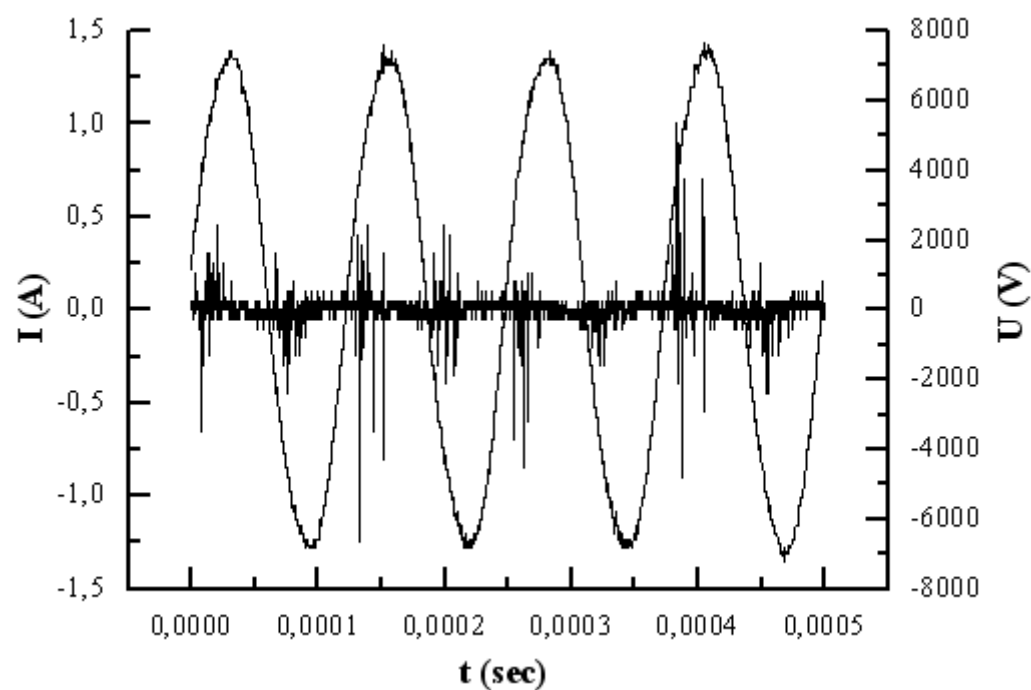
V této kapitole se již budu věnovat konkrétním naměřeným hodnotám a jejich vzájemnému srovnání. Osciloskop je nastaven tak, aby změřil 2500 hodnot v časovém intervalu 1ms (0,5ms pro dusík). Jak jsem se již zmínil, napětí z kanálu měřícího proudové výboje přepočítáme na proud pomocí Ohmova zákona a znalosti předřadného odporu 1,6Ω. Následně lze vytvořit graf závislosti proudu na napětí v daném časovém intervalu. Jelikož jednotlivých měření jsem provedl přes 60, uvedu pro příklad grafy znázorňující vždy výboj probíhající při maximálním změřeném napětí a frekvenci 8 kHz pro oba plyny plus argon s rychlostí průtoku plynu 5l/min pro srovnání jeho vlivu na V-A charakteristiku.



Obr. 6.2: V-A charakteristika pro argon při  $f = 8\text{kHz}$ , průtok 3l/min s amplitudou napájecího napětí 3,68kV.



Obr. 6.3:  $V$ - $A$  charakteristika pro argon při  $f = 8\text{kHz}$ , průtok  $5\text{l/min}$  s amplitudou napájecího napětí  $2,7\text{kV}$ .



Obr. 6.4:  $V$ - $A$  charakteristika pro dusík při  $f = 8\text{kHz}$ , průtok  $3\text{l/min}$  s amplitudou napájecího napětí  $7,4\text{kV}$ .

Z těchto tří grafů lze úvahou vyčíst několik zajímavých věcí, zvláště zahrneme-li do úvahy všechna měření při dané frekvenci a průtoku. Na grafech z obr. 6.2 a 6.3 je zobrazena  $V-A$  charakteristika pro argon s průtokem 3l/min a 5l/min. Lze jasně vidět, že proudové impulzy u průtoku 3l/min dosahují o řád vyšších hodnot než při 5l/min. Je zde jistý rozdíl v amplitudách daný zobrazením maximálních naměřených hodnot, nicméně při porovnání obou průtoků s amplitudou napájecího napětí 2,5kV je situace stejná, ne-li výraznější, jelikož s tímto napětím u průtoku 5l/min téměř nedošlo k zažehnutí výboje. Tento výsledek lze předem předpokládat a vysvětlit tak, že při vyšším průtoku se nosný plyn nestíhá dostatečně rychle ionizovat, a proto mnohem hůře dochází k výbojům mezi elektrodami. Jejich proud je řádově nižší, stejně jako jejich výskyt. Zajímavé také je, že veškeré výboje při 5l/min byli čistě filamentární, přesto již při relativně nízkém napájecím napětí došlo k okamžitému zažehnutí výboje. To by mohly mít za následek prokazatelně velmi dobré vlastnosti argonu jako nosného plynu. Tento jev může být námětem dalšího zkoumání.

Další patrnou věcí, tentokrát z grafů na obr. 6.2 a 6.4, jsou viditelně odlišné vlastnosti obou plynů. Zatímco u argonu došlo k okamžitému zapálení výboje již při amplitudě napájecího napětí 3,68kV, u dusíku bylo třeba dosáhnout napětí 7,4kV. Nadruhou stranu jsou u dusíku jasně patrné až trojnásobně silnější výboje než u argonu, jelikož obecně je pro zapálení výboje v dusíku zapotřebí až několikanásobně vyššího napětí, viz. Tab. 6.2.

Tab. 6.2:  $U_{min}$  pro zapálení výboje při různých frekvencích.

|                            |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|
| Argon pro frekvenci        | 4kHz | 6kHz | 8kHz |
| Zapálení výboje $U$ (kV):  | 2,68 | 2,84 | 3,24 |
| Dusík pro frekvenci        | 4kHz | 6kHz | 8kHz |
| Zapálení výboje $U$ (kV) : | 7,75 | 9,8  | 7,2  |

Ke způsobu určení minimálního napětí pro zapálení výboje se vrátím později. Nyní je jasně vidět, že k ionizaci dusíku je zapotřebí mnohem vyššího napětí, nicméně následný výbojový proud je také výrazně vyšší. Dá se tedy předpokládat určitá přímá úměra mezi nosnými vlastnostmi obou plynů. Ještě je třeba zmínit, že anomálie vzniklá u dusíku pro frekvenci 8kHz – tedy nižší než přechází  $U_{min}$  je způsobena změnou mezery mezi elektrodami z 4mm na 3mm, tím je jasně prokázán vliv velikosti mezery na velikost napětí potřebného pro zapálení výboje. Další dopady prozkoumám dále.

K dalším závěrů je již třeba naměřená data dále zpracovat.



## 7 Zpracování dat

### 7.1 Okamžitý výkon

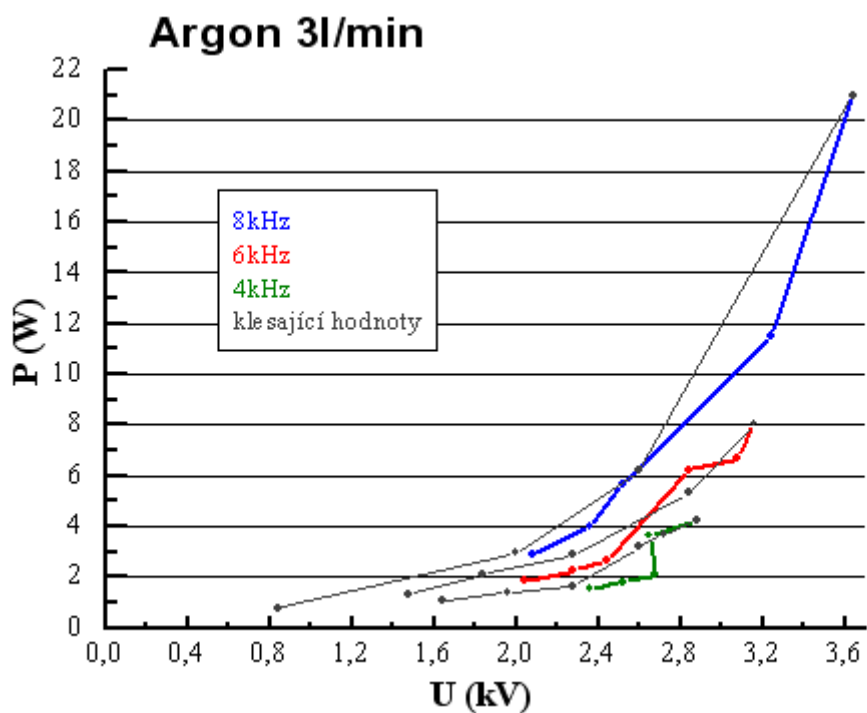
#### 7.1.1 Argon

První veličinou, kterou lze získat výpočtem z naměřených dat je hodnota okamžitého výkonu. Ve své podstatě jde o zprůměrovaný výkon ze všech měřených hodnot při daném napětí a frekvenci. Pro výpočet výkonu jsem použil vzorec  $P=UI[W]$  kde  $U$  představuje napájecí napětí a  $I$  proud mezi elektrodami. Následoval výpočet průměrného  $P$  v absolutní hodnotě ze všech naměřených hodnot v rámci jednoho měření. Výsledkem jsou dvě tabulky, zvlášť pro dusík a argon, ze kterých lze určit dopady jednotlivých konfigurací na výsledný okamžitý výkon  $P$ .

Tab 7.1: Argon, závislost okamžitého výkonu  $P$  na napětí  $U$  při různých frekvencích.

| Argon 4kHz |       | Argon 6kHz |       | Argon 8kHz |       |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| U (kV)     | P (W) | U (kV)     | P (W) | U (kV)     | P (W) |
| 2,36       | 1,52  | 2,04       | 1,84  | 2,08       | 2,91  |
| 2,52       | 1,81  | 2,28       | 2,24  | 2,36       | 3,99  |
| 2,68       | 2,11  | 2,44       | 2,64  | 2,52       | 5,68  |
| 2,65       | 3,64  | 2,84       | 6,22  | 3,24       | 11,5  |
| 2,88       | 4,25  | 3,08       | 6,69  | 3,64       | 21    |
| 2,72       | 3,71  | 3,16       | 8,06  | 2,6        | 6,21  |
| 2,6        | 3,19  | 2,84       | 5,32  | 2          | 2,95  |
| 2,28       | 1,66  | 2,28       | 2,86  | 0,84       | 0,78  |
| 1,96       | 1,4   | 1,84       | 2,11  | N/A        | N/A   |
| 1,64       | 1,06  | 1,48       | 1,34  | N/A        | N/A   |

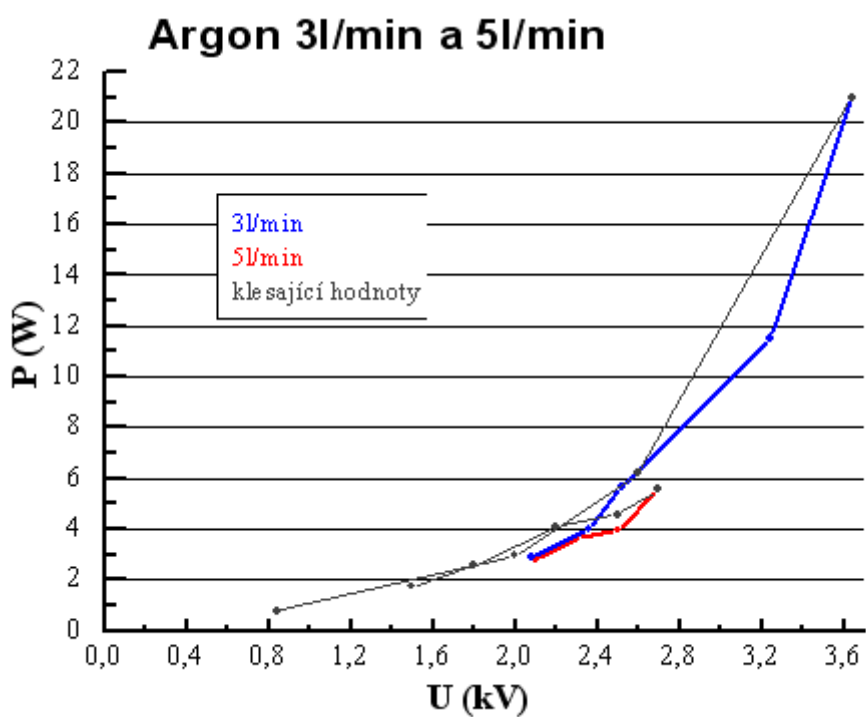
V tab. 7.1 jsou zobrazeny hodnoty okamžitého výkonu  $P$  vztaženy k napájecímu napětí  $U$ , pro argon při průtoku 3l/min a vzdálenosti elektrod 3mm. Tlustou čarou zarámované hodnoty označují nejvyšší dosažený okamžitý výkon a zároveň i napětí při daných podmínkách pro měření. Mnohem zajímavější jsou ovšem barevně vyznačené hodnoty, které znázorňují, zvláště u vyšších frekvencí, skokový nárůst okamžitého výkonu při zapálení výboje, zatímco napájecí napětí zůstává bez výraznější změny. Vliv frekvence na schopnost plynu přenášet mnohem větší náboj je již zde patrná, na následujícím obrázku 7.1 je graf znázorňující vliv frekvence na hodnotu okamžitého výkonu a obecně zanedbatelného vlivu napájecího napětí.



Obr. 7.1:  $U$ - $P$  graf pro Argon 3l/min.

Kromě vlivu frekvence na výkon, lze na grafu z obr. 7.1 zřetelně vidět skoková změna výkonu, zvláště u křivky pro frekvenci 4 kHz v oblasti mezi 2,4 – 2,8 kV. U frekvence 8 kHz lze navíc pozorovat celkový nárůst výkonu při relativně minimální změně napětí.

V dalším grafu (viz obr. 7.2) je srovnání okamžitého výkonu při stejné frekvenci, ale rozdílném průtoku (3l/min a 5l/min).



Obr. 7.2: Graf rozdílu mezi argonem s průtoky 3l/min a 5l/min při  $f = 8\text{kHz}$

Tab. 7.2: Argon, závislost okamžitého výkonu  $P$  na napětí  $U$  při různém průtoku

| Argon 8kHz 3l |       | Argon 8kHz 5l |       |
|---------------|-------|---------------|-------|
| U (kV)        | P (W) | U (kV)        | P (W) |
| 2,08          | 2,91  | 2,1           | 2,79  |
| 2,36          | 3,99  | 2,3           | 3,6   |
| 2,52          | 5,68  | 2,5           | 3,96  |
| 3,24          | 11,5  | 2,7           | 5,55  |
| 3,64          | 21    | 2,5           | 4,56  |
| 2,6           | 6,21  | 2,2           | 4,09  |
| 2             | 2,95  | 1,8           | 2,57  |
| 0,84          | 0,78  | 1,5           | 1,74  |

Z grafu na obr. 7.2 lze pozorovat nepoměr mezi okamžitým výkonem při průtoku 3l/min (modrá křivka) a 5l/min (červená křivka). Přestože frekvence je v obou případech 8kHz, je zřejmé, že plyn se při rychlejší průtoku nedokázal dostatečně rychle ionizovat a vést podobné množství proudu mezi elektrodami jako při pomalejší průtoku. To tedy potvrzuje vliv rychlosti průtoku na vlastnosti nosného plynu, jak bylo možné vyčíst již z V-A charakteristik (kap. 6.2). Je zde patrná i jistá podobnost mezi argonem o průtoku 3l/min s frekvencí napětí 4 kHz a argonem o průtoku 5l/min s frekvencí napájecího napětí 8 kHz. Nicméně tato podobnost může být čistě náhodná a nelze z ní dedukovat existenci úměry mezi frekvencí a průtokem.

Na obou zmíněných grafech (obr. 7.1 a 7.2) lze pozorovat také šedé křivky, které znázorňují hodnoty změřené po dosažení maximální hodnoty napětí/výkonu, při daných podmínkách měření, tedy při okamžitém zapálení výboje po 30sekundovém intervalu (viz. kap. 6.1). Ty ukazují na vlastnost plynu, kdy při probíhající výboji i po snížení napětí stále výboj probíhá a to i v hodnotách, ve kterých k zapálení výboje nedošlo (opět po 30 sekundách). Je možné předpokládat, že při delším časovém intervalu před odečtením hodnot by k zapálení došlo, nicméně pokud je potřeba zapálit výboj okamžitě pro nižší napětí, případně frekvenci, nebo vyšší hodnotu průtoku, je vhodné vybudit výboj vysokou hodnotou napětí/frekvence a poté snížit hodnoty na požadované.

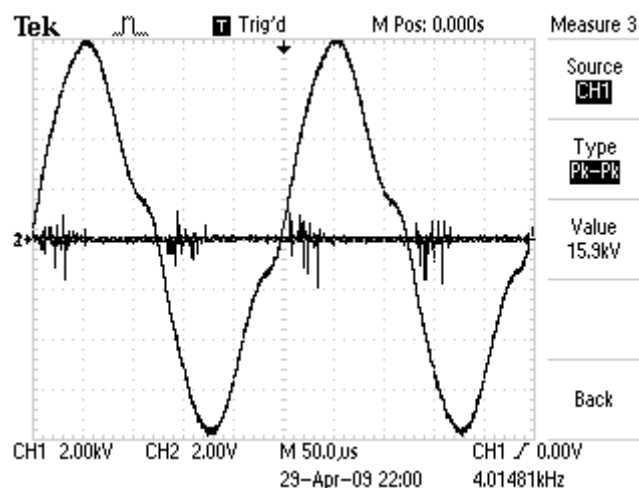
## 7.1.2 Dusík

U dusíku lze očekávat, že pro zapálení výboje bude potřeba několikanásobně vyšších hodnot napětí a tudíž i okamžitý výkon bude v tomto případě vyšší. Již v kapitole 6.2 byly na  $V$ - $A$  grafu kromě napětí i zřetelné vyšší hodnoty proudu při výbojích. Potřeba vyššího napětí je, mimo jiné, také dána energetickými ztrátami při disociaci a excitaci molekul dusíku. Pro výpočet okamžitého výkonu bylo použito stejné metody jako v případě argonu.

Tab 7.3: Dusík, závislost okamžitého výkonu  $P$  na napětí  $U$  při různých frekvencích.

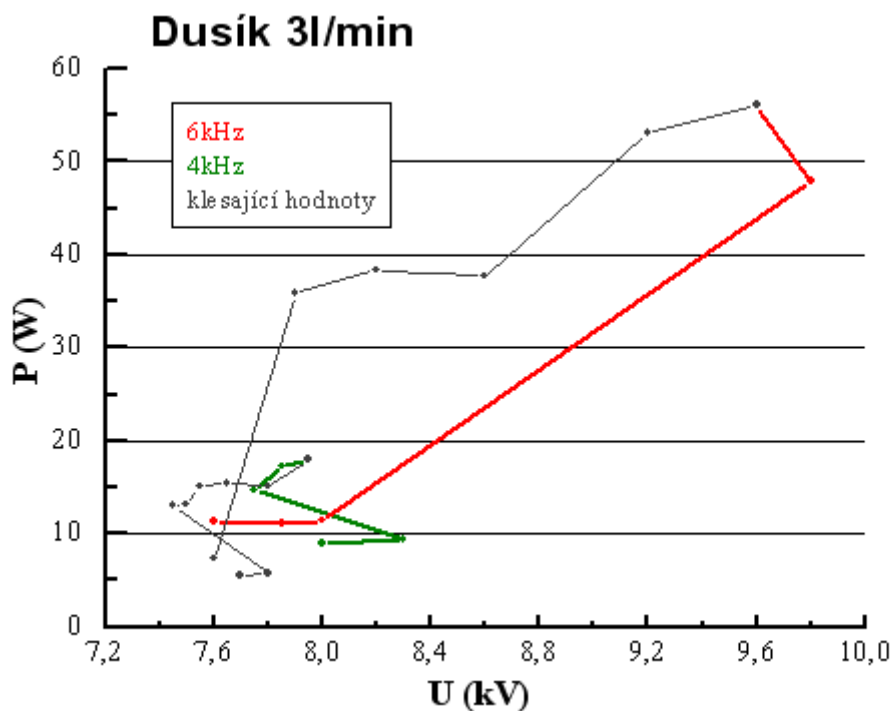
| Dusík            |       |                  |       |                  |       |
|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| 4kHz, mezera 4mm |       | 6kHz, mezera 4mm |       | 8kHz, mezera 3mm |       |
| U (kV)           | P (W) | U (kV)           | P (W) | U (kV)           | P (W) |
| 8                | 8,93  | 7,6              | 11,33 | 7,5              | 10,94 |
| 8,3              | 9,38  | 7,85             | 11,17 | 7,3              | 16,15 |
| 7,75             | 14,67 | 8                | 11,43 | 7,3              | 19,94 |
| 7,85             | 17,24 | 9,8              | 47,95 | 7,4              | 20,28 |
| 7,95             | 17,94 | 9,6              | 56,07 | 7,3              | 20,02 |
| 7,8              | 15,09 | 9,2              | 53,13 | 7,3              | 18,03 |
| 7,65             | 15,46 | 8,6              | 37,7  | 7,1              | 14,73 |
| 7,55             | 15,08 | 8,2              | 38,36 | 7,7              | 7,7   |
| 7,5              | 13,15 | 7,9              | 35,89 | N/A              | N/A   |
| 7,45             | 12,98 | 7,6              | 7,34  | N/A              | N/A   |
| 7,8              | 5,73  | N/A              | N/A   | N/A              | N/A   |
| 7,7              | 5,54  | N/A              | N/A   | N/A              | N/A   |

Dusík je jako nosný plyn poměrně nevhodný. V laboratorních podmínkách jsem při měření s frekvencí 4 kHz dosáhl možností regulovatelného zdroje stejnosměrného napětí. Jak je vidět na obrázku 7.3, docházelo k deformaci sinusoidy napájecího napětí, dále také k přehřívání transformátoru a bylo poměrně riskantní dodržovat postup měření s 30sec. intervalem před odečtením dat. Důkazem bylo spálení transformátoru a následné výměny. Z tohoto důvodu jsem provedl pouze tři měření, přičemž při 8 kHz jsem změnil mezeru mezi elektrodami z 3mm na 4mm. Vysoká frekvence v tomto případě měla za následek zapálení výboje již při nízkém napětí, což zároveň vedlo k poklesu hodnoty okamžitého výkonu. Lze zde také pozorovat jev, kdy při zapálení výboje mírně poklesla hodnota napětí, ale výkon stále skokově vzrostl.



Obr. 7.3: Deformace sinusoidy v důsledku dosažení limitu zařízení

Pro úplnost ještě uvádím obr 7.4 s grafem vlivu frekvence napájecího napětí na  $U$ - $P$  charakteristiku u dusíku, který potvrzuje fakta zmíněná v kapitole 7.1. Zároveň je možné pozorovat anomálii s náhlým poklesem napětí při zapálení výboje u charakteristiky zobrazující průběh při frekvenci 4kHz. U klesajících hodnot stále platí, že i při nižším napětí si výboj udržuje poměrně vysoký okamžitý výkon v porovnání s argonem, kde velmi rychle klesal.



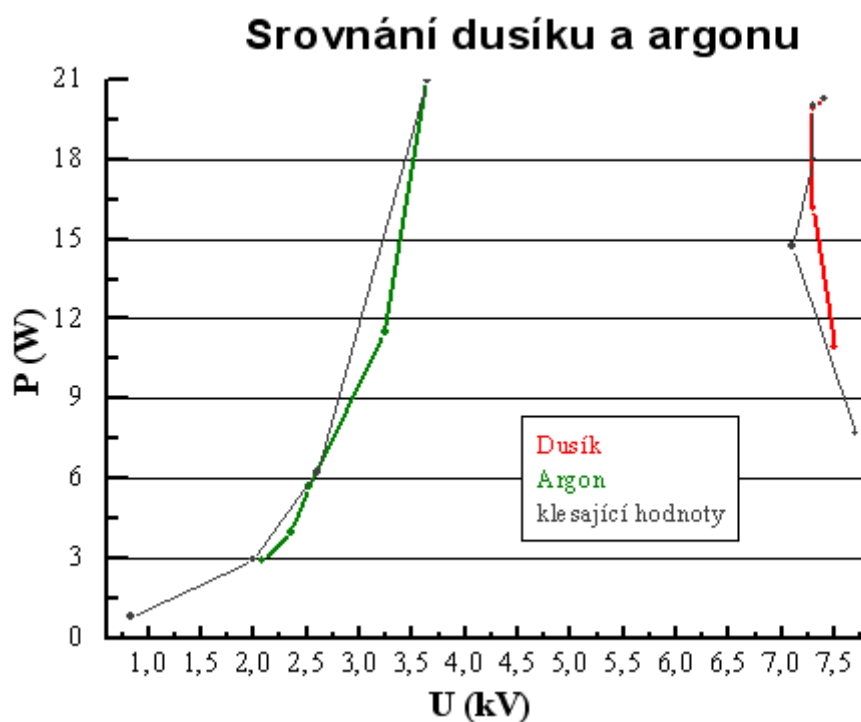
Obr 7.4.:  $U$ - $P$  graf pro Argon 3l/min.

### 7.1.3 Srovnání

V této krátké kapitole budu věnovat pozornost srovnání vlastností argonu a dusíku odvozené od hodnot okamžitého výkonu. K tomuto účelu použiji hodnoty naměřené při frekvenci 8 kHz, průtoku 3l/min a mezeře mezi elektrodami 3mm jak pro dusík tak argon. Viz. následující tabulka 7.4 a obrázek 7.5 s grafem.

Tab 7.4: Srovnání vlastností dusíku a argonu

| Argon 8khz |       | Dusík 8khz |       |
|------------|-------|------------|-------|
| U (kV)     | P (W) | U (kV)     | P (W) |
| 2,08       | 2,91  | 7,5        | 10,94 |
| 2,36       | 3,99  | 7,3        | 16,15 |
| 2,52       | 5,68  | 7,3        | 19,94 |
| 3,24       | 11,5  | 7,4        | 20,28 |
| 3,64       | 21    | 7,3        | 20,02 |
| 2,6        | 6,21  | 7,3        | 18,03 |
| 2          | 2,95  | 7,1        | 14,73 |
| 0,84       | 0,78  | 7,7        | 7,7   |

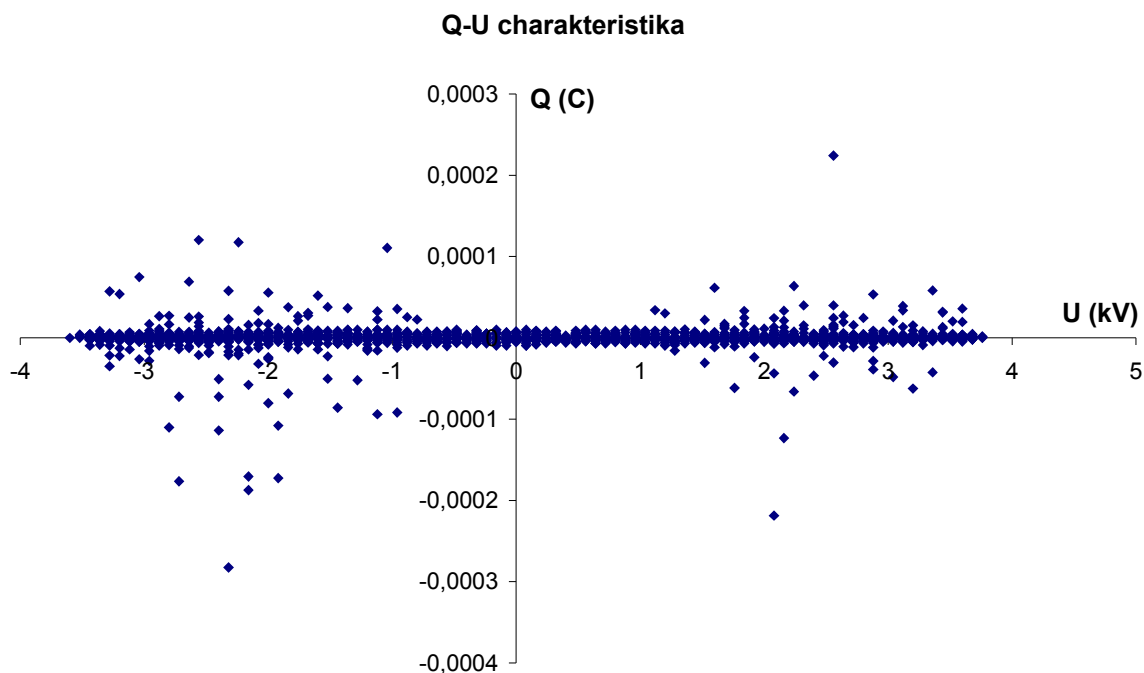


Obr. 7.5: Graf srovnání vlastností dusíku a argonu

Z grafu lze usoudit, že dusík při konfiguraci, která se používá pro měření s argonem, se z tohoto úhlu pohledu chová velmi podobně jako argon, s tím rozdílem, že pro zažehnutí výboje je nutné mnohem větší napětí a je tudíž schopen přenosu pouze vysokých proudů.

## 8 Výpočet elektrického příkonu

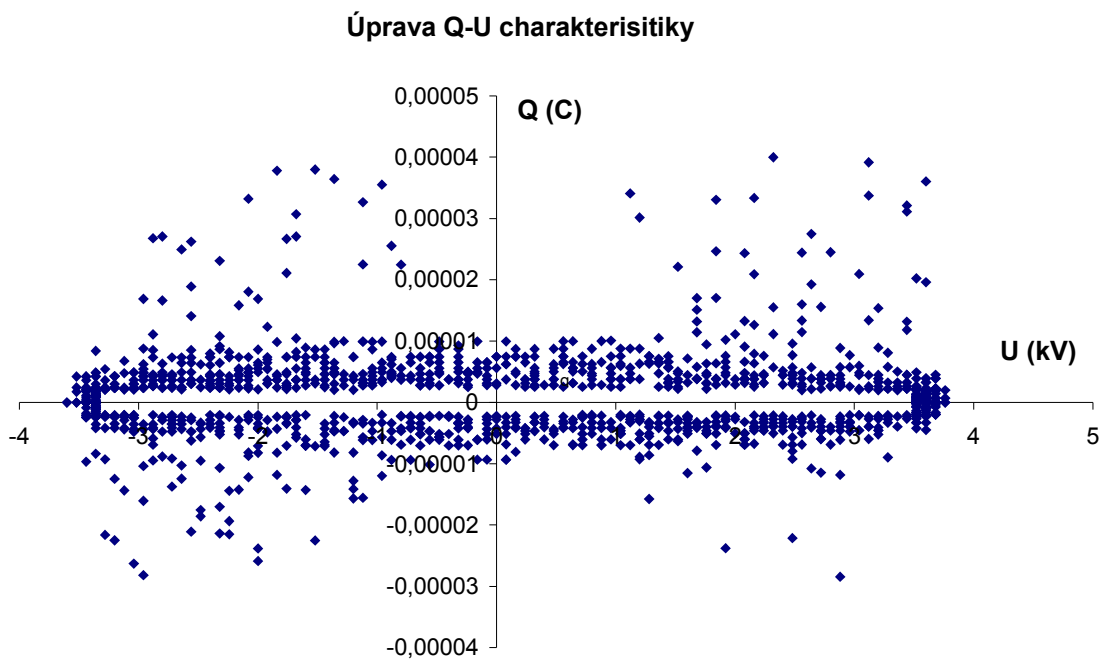
Nejzajímavějšími daty jsou  $Q$ - $U$  charakteristiky, vytvořené úpravou naměřených dat a to konkrétně přepočtem proudu na přenesený náboj a následné vztažení tohoto náboje k napájecímu napětí. Samotná charakteristika je poté využita k výpočtu spotřebované energie  $E_{el}$ , což se provede výpočtem její plochy. K tomu jsem využil lichoběžníkovou metodu.



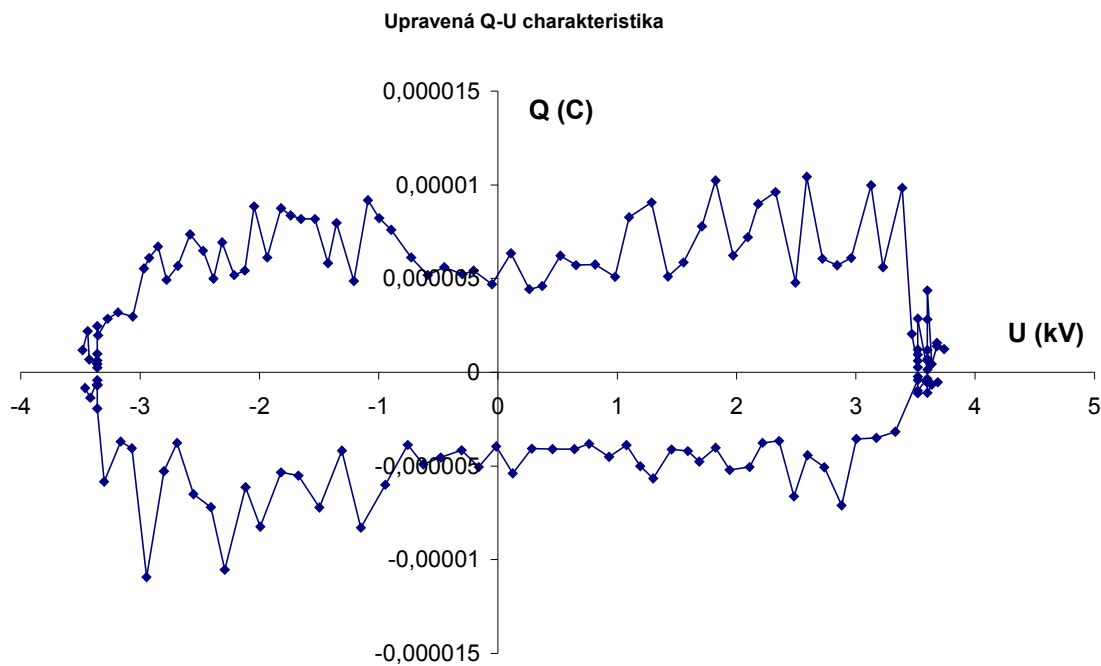
Obr. 8.1: Neupravená  $Q$ - $U$  charakteristika pro argon 8 kHz, 3l/min

$Q$ - $U$  charakteristika sestavená z neupravených hodnot je vyobrazena na obrázku 8.1. Tato byla sestavena pouze z přepočítaných naměřených hodnot, tedy z 2500 bodů. Je zřejmé, že zvláště kvůli množství bodů pohybujících se kolem nulových hodnot je velmi nepřehledná v důsledku náhodně naměřených extrémů, které mají až trojnásobnou hodnotu než 99% zbývajících hodnot. Tyto extrémy jsou značně zkreslující (zvláště extrém v prvním kvadrantu grafu) a pro lepší prezentaci grafu a univerzálnější hodnoty spotřebované energie, bylo nutné charakteristiku upravit a snížit počet extrémů i hodnot na přijatelné číslo. Proces úpravy hodnot zahrnoval „ořezání“ o extrémy a zároveň snížení počtu bodů kolem nuly – tedy jejich eliminaci v takové míře, aby zprůměrováním zbývajících hodnot bylo dosaženo přibližně stejné plochy, jakou má původní neupravená charakteristika. Nicméně ořezáním a zprůměrováním dochází k logickému zmenšení plochy, což má ale výhodu v univerzálnosti

takovéto nové charakteristiky, jelikož je daleko méně ovlivněna anomáliemi jednoho konkrétního měření. Na následujících obrázcích 8.2 a 8.3 je znázorněn postup úpravy charakteristiky z obrázku 8.1.



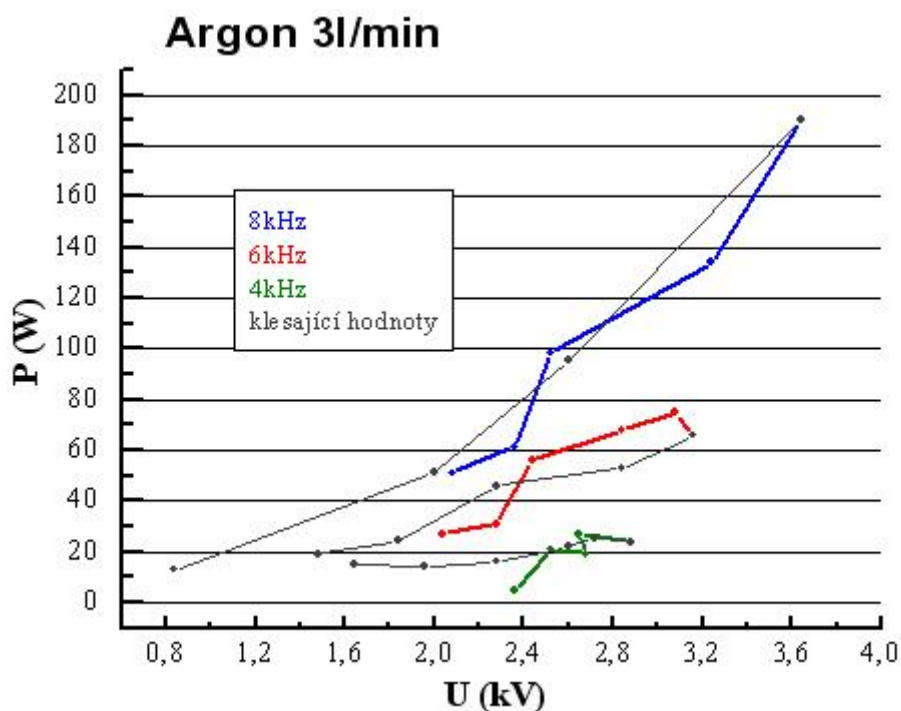
Obr. 8.1: První fáze úpravy Q-U charakteristiky, „ořezání“



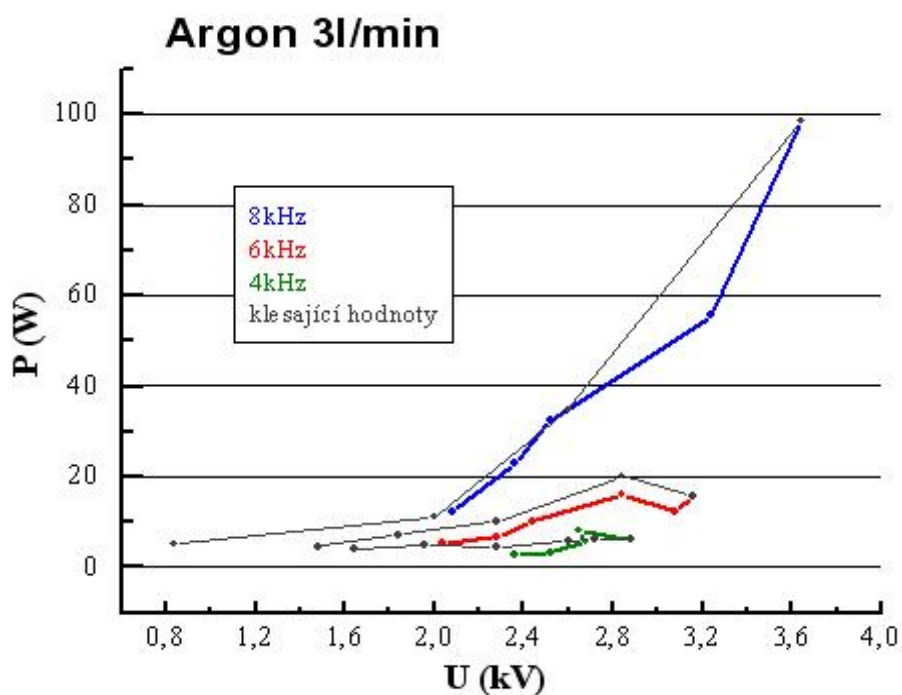
Obr. 8.3: Druhá fáze úpravy Q-U charakteristiky, zprůměrování.



Na obrázku 8.3 je již finální podoba upravené Q-U charakteristiky, je patrné, že důsledkem „ořezání“ a následného zprůměrování hodnot došlo k zpřehlednění grafu a zároveň k eliminaci extrémů. Přesnost takto upravené charakteristiky je sporná, zvláště její vypovídající hodnota. Proto je vhodné přímé srovnání  $P_{el}$  vypočtené za pomoci jak neupravené, tak upravené charakteristiky.



Obr. 8.4:  $P_{el}$  vypočítané za pomoci neupravených dat vztažené k napájecímu napětí



Obr. 8.5:  $P_{el}$  vypočítané za pomoci upravených dat vztažené k napájecímu napětí

Pro tento účel se ze dvou použitých plynů více hodí argon, jelikož dusík způsoboval více anomálií a při nízké frekvenci napájecího napětí bylo jeho měření na hranici možností experimentálního zařízení. Výpočet  $P_{el}$  je detailně popsán v kapitole 4.2.

Grafy na obrázcích 8.4 a 8.5 mají téměř podobný trend, z toho vyplývá, že upravené hodnoty mají stejnou vypovídající hodnotu pro srovnávání jednotlivých měření a analýzu vlastností plynu při různých konfiguracích. Rozdíl je v hodnotách  $P_{el}$ , které dosahují nižších čísel při použití upravené charakteristiky. Je zřejmé, že to je způsobeno absencí extrémů a zprůměrováním, což opravdu v konečném důsledku zmenší plochu grafu. Nicméně dá se předpokádat, že upravená charakteristika je univerzální pro danou konfiguraci, jelikož není zatížena momentálními anomáliemi. Pro úplnost uvádím tabulku pro srovnání rozdílů hodnot.

Tab 8.1: Srovnání  $P_{el}$  vypočtené za použití původních a upravených dat.

| Argon 8 kHz  |              |        |
|--------------|--------------|--------|
| upravené     | naměřené     |        |
| $P_{el}$ (W) | $P_{el}$ (W) | U (kV) |
| 12,32        | 50,86        | 2,08   |
| 22,98        | 61,22        | 2,36   |
| 32,34        | 98,2         | 2,52   |
| 55,61        | 134,14       | 3,24   |
| 98,62        | 190,01       | 3,64   |
| 34,89        | 95,3         | 2,6    |
| 11,18        | 51,32        | 2      |
| 5,09         | 12,97        | 0,84   |
| N/A          | N/A          | N/A    |
| N/A          | N/A          | N/A    |

Tab 8.2:  $P_{el}$  vypočtené za použití původních dat.

| Dusík     |              |           |              |           |              |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| 4 kHz 3mm |              | 6 kHz 3mm |              | 8 kHz 4mm |              |
| U (kV)    | $P_{el}$ (W) | U (kV)    | $P_{el}$ (W) | U (kV)    | $P_{el}$ (W) |
| 8         | 85,34        | 7,6       | 116,12       | 7,5       | 127,99       |
| 8,3       | 58,07        | 7,85      | 112,4        | 7,3       | 144,22       |
| 7,75      | 83,04        | 8         | 108,82       | 7,3       | 157,61       |
| 7,85      | 86,43        | 9,8       | 294,15       | 7,4       | 134,66       |
| 7,95      | 80,72        | 9,6       | 266,77       | 7,3       | 176,32       |
| 7,8       | 73,26        | 9,2       | 224,59       | 7,3       | 142,08       |
| 7,65      | 85,37        | 8,6       | 146          | 7,1       | 165,31       |
| 7,55      | 75,07        | 8,2       | 144,62       | 7,7       | 121,46       |
| 7,5       | 75,37        | 7,9       | 137,33       | N/A       | N/A          |
| 7,45      | 73,39        | 7,6       | 70,12        | N/A       | N/A          |
| 7,8       | 44,22        | N/A       | N/A          | N/A       | N/A          |
| 7,7       | 43,54        | N/A       | N/A          | N/A       | N/A          |

## 9 Závěr

Veškeré úkoly zadané pro tuto práci byly splněny. Přestože předmětem této práce bylo hlavně srovnat chování dvou plynů a různých konfigurací, některé výsledky byly překvapivé a jejich příčiny by si zasloužily další prozkoumání. Zvláště u dusíku je situace komplikovanější a pro vypovídající hodnoty by byla potřeba provést několikanásobně víc měření, na jejichž základě by se dal nadefinovat vhodnější postup měření. Nicméně teze vyvozené analýzou okamžitého výkonu vztaženého k napájecímu napětí se dají považovat za správné, výpočet elektrického příkonu a jeho vztažení k napájecímu napětí to potvrdil. Zdá se však, že k analýze dusíku se minimálně v tomto případě více hodil právě okamžitý výkon než elektrický příkon, jelikož Q-U charakteristiky jsou u tohoto plynu hůře zpracovatelné a je zde větší možnost chyby.

Přestože zpracování Q-U charakteristik bylo časově nejnáročnějším úkolem této práce, jejich vypovídající hodnota je srovnatelná s okamžitým výkonem, který se získá mnohem snadněji a rychleji. Je proto nutno říct, že pro základní a rychlé srovnání se tato metoda moc nehodí, nicméně pro další a hlubší zkoumání výboje je velmi důležitá.

Pro studium plazmatu vznikajícího průchodem bariérového výboje plynem je tato práce přínosem především analýzou elektrických vlastností tohoto výboje, navržením postupu měření a postupu zpracování dat. Je zde i mnoho prostoru pro další zkoumání a díky této práci je možné se zaměřit rovnou na problematické nebo zajímavé vlastnosti a jevy. Toto platí zvláště pro dusík, který má pravděpodobně větší potenciál než argon a jeho další studium by mohlo přinést zajímavé výsledky.

V tomto výzkumu bych rád pokračoval i v dalším studiu, jelikož plazma jako takové má obrovský potenciál a jeho úplné pochopení by mohlo vést k revoluci v mnoha odvětvích jako je například dobývání vesmíru, kde se uvažuje jako možný štít proti radiaci při cestě na Mars, nebo řešení energetické krize, kdy je jedním z klíčů k uvedení fúzního reaktoru na výrobu elektřiny do reality atd.

## 10 Použitá literatura

- [1] Aubrecht V. *Fyzika a diagnostika plazmatu* . skripta, VUT Brno, 2006. 117 s.
- [2] Wagner H. E. a kol. *The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment*, Vacuum, díl 71, kapitola 3, Regensburg, Německo, 2003. s. 417-436, ISSN 0042-207X
- [3] Kracík J. ,Tobiáš J. *Fyzika plazmatu* . Academia, Praha, 1966.
- [4] Janča J. a kol. *Fyzika plazmatu I* . MU Brno, 2003.
- [5] Chen F. F., J. P. Chang J. P. *Lecture Notes On Principles Of Plasma Processing* . Spriger, Japan, 2003. 208 s. ISBN 03-064-7497-2
- [6] Schmiedt L. et al. *Fyzika plazmatu : Úvod* [online]. [Praha] : [Univerzita Karlova], 2006. [cit. 2008-10-15]. Dostupné z WWW:  
<<http://physics.mff.cuni.cz/ascii.cs/kfpp/s4r/plazma/>>.
- [7] Hollahan J. ,Bell A. *Techniques and Applications of Plasma Chemistry* . Wiley & Sons, 1974.
- [8] Schmidt M.,Becker K. *Encyclopedia of Chemical Physics and Physical Chemistry* . díl 3, Institute of Physics Publishing, 2001.
- [9] *Fyzikální materiály* [online]. Verze 1.0. [Liberec] : Honsoft, 2006. [cit. 2010-05-31]. *Vedení elektrického proudu v plynech a ve vakuu* . Dostupné z WWW:  
<<http://jan.gfxs.cz/studium/files/elektro/plyny.pdf>>.
- [10] von Siemens W. *Poggendorff's Ann* . 1857, 102, 120
- [11] Kogelschatz U. *Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications* . Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 13, no.1, 2003. 46 s.
- [12] Kloc P. *Modelování bariérových výbojů za atmosférického tlaku*. Brno, 2008. 51 s.

## **11 Seznam příloh**

Příloha 1.: Obsah CD:

- Elektronická verze tohoto dokumentu